

КОСМИЧЕСКОЕ  
ВЕЩЕСТВО  
И  
ЗЕМЛЯ









АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

# КОСМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЗЕМЛЯ

Ответственный редактор  
д-р геол.-мин. наук *Ю. А. Долгов*



НОВОСИБИРСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
1986

УДК 523.51

Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

В сборнике обсуждаются вопросы взаимодействия космического вещества с атмосферой и поверхностью Земли, образования и геологического строения древних метеоритных кратеров. Описаны отдельные химические элементы в метеоритах. Уделено внимание изучению последствий падения Тунгусского метеорита.

Книга адресована астрономам, геологам, геохимикам, всем, интересующимся проблемой Тунгусского метеорита.

Рецензенты *А. Н. Дмитриев, А. М. Черницов*

Редакционная коллегия: *А. П. Бояркина, акад. АМН СССР Н. В. Васильев, Г. М. Иванова*

К 1705070000—894  
042(02)—86 157—86—IV

© Издательство «Наука», 1986 г.

## ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА (1970—1980 гг.)\*

К 1970-м гг. стало очевидно, что решить проблему Тунгусского метеорита можно, только сочетая исследования по физике взрыва с изучением материального состава взорвавшегося тела. В связи с этим возникла необходимость сбора вещества Тунгусского метеорита на обширной территории с учетом фоновых выпадений космической пыли.

Был определен природный объект (сфагновый торф верховых болот), оптимальный для изучения выпадения космических аэрозолей [92] на основании, во-первых, его широкого территориального распространения, во-вторых, высокой адсорбционной активности, исключающей вторичное переотложение нерастворимых частиц, в-третьих, относительной простоты датировки слоев торфяной залежи, в-четвертых, наличии доступной в полевых условиях методики выделения и морфологической идентификации метеорной пыли.

Далее, в результате предварительных расчетов Л. В. Кириченко [73] и анализа многолетних данных аэрологического зондирования в пос. Ванавара, выполненного Н. П. Фаст и Л. В. Павловой [126], оказалось возможным прогнозировать наиболее вероятные области оседания облака аэрозоля, образовавшегося в результате Тунгусского взрыва.

Наконец, к 1969 г. существенно возросли возможности использования тонких аналитических, в том числе ядерно-физических, методов в целях выявления и исследования микроколичеств космического вещества.

Программа площадной космохимической съемки была начата в 1969 г. и представляла собой продолжение работ по выявлению в природных объектах района катастрофы метеорного вещества, проводившихся в 1958—1962 гг. К. П. Флоренским [132, 133]. Картина территориального распространения метеорной пыли в междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок, выявленная К. П. Флоренским, не была однозначно интерпретируемой — требовалось изучить площадные закономерности выпадения космического материала и проанализировать его состав с помощью совершенных аналитических методов. Программа включала следующие направления:

---

\* Первая часть обзора (1958—1969) помещена в сборнике «Метеоритные исследования в Сибири» (Новосибирск: Наука, 1984).

— съемку выпадений метеорной пыли на площади 15 тыс. км<sup>2</sup> с отбором 600—700 колонок сфагнового торфа и послойным определением концентрации метеорных сферул в катастрофном, до- и послекатастрофных слоях. Целью было проверить предположение о значительном превышении естественного фона выпадений метеорной пыли в эпоху, включающую 1908 г., и в случае его подтверждения определить территориальные закономерности распространения сферической фракции вещества Тунгусского метеорита;

— отбор крупных проб торфа в «горячих» точках, обнаруженных при съемке, с целью получения достаточных для анализов количеств искомого вещества;

— анализ шариков из катастрофного, до- и послекатастрофного слоев для определения элементного состава сферул с помощью микрометодов, включая использование микрозонда и нейтронно-активационного анализа;

— послойный элементный и изотопный анализы торфяных колонок с учетом возможности выпадения вещества Тунгусского метеорита в виде не только сферической, но и остроугольной фракции, а также в форме растворимых мигрирующих соединений; поиски космических минералов;

— проведение всего комплекса аналитических работ (взято 250 пикетов) с выходом за пределы изучаемого района на расстояние до 400 км и более для изучения закономерностей оседания абляционного следа Тунгусского метеорита и шлейфа рассеяния его взрыва;

— определение интенсивности фоновых выпадений метеорной пыли в контрольных, удаленных от промышленных центров районах (северные притоки Нижней Тунгуски, север Томской области) и в промышленных районах для получения материалов, позволяющих дифференцировать метеорные аэрозоли от техногенных (окрестности гг. Томска и Ленинграда, Тюменская область).

Итоги первого направления таковы [15—17, 21—26, 30, 31, 35—37]:

1) в сфагновых торфах верховых болот района катастрофы присутствуют стеклянные (силикатные) и металлические микросферулы размером до 80—100 мкм. Это относится как к слою торфа, включающему в себя годовой прирост мха 1908 г., так и к лежащим выше и ниже его слоям;

2) по крайней мере часть обнаруженных частиц имеет метеорное происхождение (такие частицы встречаются в слоях торфа, относящихся к периоду, когда глобальный промышленный фон практически отсутствовал и может не приниматься в расчет);

3) на основании определения числа микросферул в фоновых, до- и послекатастрофных слоях и экстраполяции этих данных на площадь поверхности Земли дана количественная оценка ежегодного притока на Землю сферической фракции метеорной пыли — 1500—3000 т/год (число это довольно стабильно и за последние 200 лет практически не менялось) [13, 14, 16];

4) в ряде точек обследованного района слой торфа, включающий в себя годичный прирост мха 1908 г., характеризуется статистически

достоверным превышением числа микросферул над фоновыми до- и послекатастрофными значениями. В районе центра катастрофы это превышение достигает 10—12 раз, а в отдельных местах число микросферул измеряется сотнями на 1 дм<sup>2</sup> поверхности;

5) в районе катастрофы выделяются три зоны существенного обогащения катастрофного слоя торфа микросфераулами (первая в виде тонкого серпа огибает центр катастрофы, вторая, весьма обширная и до сих пор не оконтурованная, располагается в 80—100 км к северо-западу от эпицентра в районе фактории Муторай, и третья находится в бассейне р. Южная Чуя к северо-востоку от места падения и к северу от предполагаемой проекции траектории метеорита). Первая из них отождествляется с зоной выпадения мелкодисперсного метеорного материала непосредственно в окрестностях места взрыва, вторая — с началом шлейфа рассеяния, третья — с зоной оседания пылевого следа болида. Кроме того, отдельные выбросы микросферул находятся недалеко от пос. Ванавара и могут быть объяснены локальным антропогенным загрязнением окружающей среды.

Необходимо подчеркнуть, что площадное распределение силикатных микросферул в торфах в общем соответствует картине распределения магнетитовых сферул в почвах, выявленной К. П. Флоренским: в обоих случаях налицо обеднение сфераулами восточного, юго-восточного, южного и юго-западного секторов района и наличие яркого максимума в северо-западном секторе. Космогенность же магнетитовых сферул подтверждается высоким содержанием в них никеля, поэтому соответствие контуров зон распространения магнетитовых и силикатных сферул свидетельствует о наличии в районе Тунгусской катастрофы обширной области выпадения метеорной пыли, образование которой датируется, на основании стратификации торфа, началом XX века, т. е. ориентировочно совпадает со временем падения Тунгусского метеорита. Это позволило сделать принципиально важный вывод о том, что данная область, по-видимому, действительно связана с выпадением тугоплавкой мелкодисперсной сферической составляющей Тунгусского метеорита. Тем самым оказалось снятым главное возражение против интерпретации полученных в 1958—1962 гг. К. П. Флоренским данных, основанное на отсутствии датировки образования в районе Тунгусской катастрофы почвенной провинции, обогащенной космическим веществом.

Выделенные из катастрофного слоя микросфераулы были изучены в лабораториях Института геологии и геофизики СО АН СССР и ГЕОХИ им. акад. Вернадского АН СССР. Главное внимание было уделено анализам силикатных шариков, так как они резко преобладают над металлическими. Ранее этой фракцией не занимались, так как методика выделения шариков из почв, использовавшаяся в экспедициях 1960—1962 гг. К. П. Флоренским, была ориентирована на магнитную составляющую космического материала, силикатные же шарики при ней, как правило, терялись, и находки их имели случайный характер. Тем не менее несколько силикатных шариков из проб почв района Тунгусской катастрофы исследовал на микрозонде

Б. Гласс [143, 144], позднее в отечественных публикациях его данные были подтверждены [54, 55].

В ходе этих исследований были получены важные результаты. Во-первых, выяснилось, что элементный состав силикатных микросферул, найденных в катастрофном слое торфа, своеобразен и, возможно, даже уникален. Для них характерно высокое содержание щелочных элементов и низкое — кремния. По этим параметрам они резко отличаются как от земных пород, так и от метеоритов, а ближе всего стоят к тектитовым стеклам.

Чуть позже Е. М. Колесникову с соавторами [80] удалось выполнить крайне трудоемкий анализ с использованием инструментального нейтронно-активационного метода, что позволило определить для высокощелочной группы силикатных шариков набор элементов-примесей. Оказалось, что шарики несколько обеднены тяжелыми элементами (Fe, Co, Sc, Eu) и обогащены легкими и летучими (Al, Na, Zn). При этом было установлено принципиально важное обстоятельство — сходство Тунгусских силикатных шариков с образцами лунных пород — «ржавой почвы» из окрестностей кратера Шорти. Образование последних [80] связывают с падением на Луну ядра кометы или углистого хондрита I типа.

Таким образом, анализы силикатных микросферул предоставили дополнительный аргумент в пользу кометной гипотезы о природе Тунгусского метеорита. В целом эти работы дали обнадеживающие результаты, однако они не только не решили поставленные ранее вопросы, но и выдвинули ряд новых.

Прежде всего, при анализе обращало на себя внимание несоответствие расчетной массы Тунгусского метеорита ( $10^5$ – $10^6$  т) общей массе микросферул: последняя не превышает нескольких тонн на площади в 15 тыс. км<sup>2</sup>. В масштабах явления микросферулы составляют, таким образом, ничтожную долю вещества метеорита — даже если принять, что все шарики имеют космогенное происхождение.

Во-вторых, нуждалась в разъяснении крайняя неравномерность распределения микросферул по площади: в пределах одного и того же торфяника одни точки засекали выраженный эффект, другие же, расположенные неподалеку, не давали превышения над фоном.

И если второе обстоятельство может рассматриваться как частный случай общей закономерности неравномерного выпадения космического вещества на поверхность Земли (явления подобного рода отмечены, например, при сборах космической пыли в Антарктиде [99]), то первое имеет сугубо принципиальный характер, ибо именно отсутствие сколько-нибудь значительного количества космического вещества в районе катастрофы служит одним из аргументов гипотезы ядерного взрыва. Противоречие между отсутствием макроколичеств выявленного космического материала на территории Тунгусской катастрофы и совокупностью обстоятельств, свидетельствующих о разрушении метеорита в междуречье Чамба — Кимчу, объясняется, вероятно, тем, что поиски метеоритного вещества, проводившиеся в 1958–1971 гг., были ориентированы не на самую представительную

его фракцию. Стало очевидно, что шарики составляют лишь ничтожную часть выпавшего материала. Естественным поэтому оказалось предположение, что основная часть вещества могла выпасть или в виде остроугольной фракции, морфологически неотличимой от земных аэрозолей, или в форме летучих и легкоподвижных растворимых соединений. Кроме того, получила известное подкрепление точка зрения, согласно которой Тунгусское космическое тело имело необычный для железных или каменных метеоритов состав.

Поиски шариков занимали важное место в программе исследований по следующим соображениям. Во-первых, не являясь наиболее представительной фракцией космического вещества, рассеянного на территории, подвергшейся воздействию Тунгусской катастрофы, шарики представляют собой образования, морфологически наиболее легко выявляемые, вследствие чего могут служить индикатором мест обогащения земной поверхности космическим веществом. Во-вторых, в более удаленных от эпицентра местах предстояло выявить зоны оседания шлейфа рассеяния и пылевого хвоста болида. Представлялось вероятным, что морфология и химический состав сферул, выпавших в центре катастрофы, в области шлейфа рассеяния и в зоне оседания пылевого хвоста, отражают различные этапы разрушения Тунгусского метеорита и поэтому сравнительное изучение их особенностей может дать информацию, существенную для понимания физики Тунгусского взрыва.

Проведение изотопных исследований логически обосновано. Как говорилось выше, среди найденных микросферул преобладали силикатные (до 90 % и более). Это давало основание предполагать, что и остроугольная фракция космического вещества, выпавшего в результате Тунгусской катастрофы, состоит из силикатов. Поскольку прямые методы отличия данного типа космической пыли от земных образований на основании морфологических признаков не разработаны, оставались косвенные, в частности определение сколового радиоуглерода [114, 116]. Метод состоит в индикации атомов  $^{14}\text{C}$ , получающихся в космическом пространстве в результате бомбардировки атомов  $^{32}\text{Si}$  высокоэнергетическими частицами, входящими в состав первичного космического излучения. Образующиеся при этом атомы  $^{14}\text{C}$  остаются в тех же узлах кристаллической решетки, в которых находились «родительские» атомы  $^{32}\text{Si}$ , и могут быть измерены. Программа по определению сколового  $^{14}\text{C}$  в силикатной фракции торфов и почв района падения проводилась с 1975 по 1980 г. Институтом геохимии и физики минералов АН УССР и Комплексной самостоятельной экспедицией (КСЭ). Оказалось, что слой торфа, относящийся к 1908 г., действительно характеризуется превышением активности  $^{14}\text{C}$  над фоновой: последняя находится за пределами ошибки опыта и, судя по всему, обязана своим происхождением силикатным частицам, выпавшим во время Тунгусской катастрофы. Общее количество силикатного материала, осевшего на территории вывала, по этим данным, составляет  $3,83 \cdot 10^3$  т. Аналогичный результат ( $4,04 - 5,64 \cdot 10^3$  т) получен и при изучении содержания сколового  $^{14}\text{C}$  в почвах района [116].

Таким образом, судя по полученным данным, Тунгусская катастрофа сопровождалась выпадением больших (тысячи тонн) количеств силикатного космогенного материала в виде остроугольных мелкодисперсных частиц. Указанная оценка снимала бы противоречие между большой (как минимум в сотни тысяч тонн) расчетной массой Тунгусского метеорита и отсутствием в районе катастрофы сколько-нибудь значительных количеств космического вещества, если бы не одно обстоятельство, оставшееся до настоящего времени не объясненным. Речь идет о том, что оценка годового баланса выпадений космической пыли на Землю по содержанию сколового  $^{14}\text{C}$  дает скорость аккреции порядка  $3,5 \cdot 10^8$  т, что на 2—3 порядка превышает оценки другими методами [113, 114]. Поэтому количественные результаты, получаемые по сколовому  $^{14}\text{C}$ , не могут считаться достаточно надежными. Следовательно, цифры, приведенные в [114], следует пока считать ориентировочными.

Тесно связан с поисками остроугольной фракции остатков Тунгусского метеорита и цикл работ по выявлению в природных объектах района космогенных минералов. Начиная с 1978 г. эти исследования проводились в большом масштабе, однако получен лишь один яркий результат — обнаружение в 1979 г. в районе Северного торфяника в слое торфа, относящемся к 1908 г., графит-лонсдейлит-алмазных сростков, космогенное происхождение которых более чем вероятно. Физические свойства и химический состав указанных образований описаны в публикациях Э. В. Собоновича с соавторами [72, 114, 115], но, к сожалению, эта находка единственная. Ее интерпретация осложняется повсеместным распространением космогенных алмазов. В последнее время появились основания думать, что подобного рода образования могут присутствовать и в фоновых выпадениях метеорной пыли [20].

Работы, целью которых было выявление и изучение космохимической (элементной и изотопной) аномалии в районе Тунгусской катастрофы, по существу являлись продолжением металло- и флуориметрической съемки района, начатой КСЭ под руководством Г. Ф. Плеханова и В. К. Журавлева еще в 1959—1960 гг. Последняя дала неоднозначный результат: наметившиеся по ряду элементов аномалии определенной интерпретации не получили [29, 71, 107—109], а повышенное содержание редкоземельных элементов, в том числе иттербия [58], в почве и растениях, приуроченное к проекции траектории Тунгусского метеорита, с трудом дифференцировалось от особенностей местной геохимической обстановки, тем более после отождествления «Метеоритной котловины» с эродированным конусом палеовулкана [112].

Назрел вопрос о смене нестратифицируемого субстрата (почвы) на стратифицируемый (торф). С этой целью в 1972 г. были начаты работы по изучению послонных особенностей элементного состава торфов района катастрофы, результаты которых изложены в [2, 91, 116] и могут быть обобщены следующим образом: в районе эпицентра Тунгусского взрыва имеется мозаичная локальная зона обогащения «катастрофного» слоя торфа рядом химических элементов, в част-



ности свинцом, никелем, кобальтом, цинком и редкими землями. Наиболее четко выражены указанные эффекты в непосредственной близости от горы Острой, близ точки «протыкания» поверхности Земли продолжением предполагаемой траектории метеорита. Этот локальный эффект может быть объяснен или вторичным переотложением терригенного материала в ходе взрыва, или выпадением метеоритного вещества, или сочетанием обоих факторов.

Данный цикл работ был ориентирован на площадную съемку, получение статистической картины и поэтому выполнялся с использованием рутинных аналитических методик (полуколичественный спектральный анализ). Выяснение же вопроса о природе выявленной аномалии предполагало применение гораздо более точных количественных ядерно-физических методов, позволяющих судить не только об элементном, но и об изотопном составе изучаемых объектов.

Именно в этом плане выполнена серия работ [44, 46, 81], в которых для исследования Тунгусской космохимической аномалии была использована нейтронная активация.

В основу стратегии этих работ С. П. Голенецкий и Е. М. Колесников впервые целенаправленно положили представление о мозаичном, а не диффузном характере выпадения космического материала в ходе разрушения Тунгусского космического тела. Действительно, ряд обстоятельств Тунгусской катастрофы, установленных в 1970—1971 гг., давал основания для такого подхода. К ним относились, во-первых, мультицентричный, по Л. А. Кулику [89], характер вывала леса в эпицентральной зоне области разрушений и, во-вторых, мозаичность распределения по площади шариков и минеральных частиц, находимых в торфе [94]. Для проверки указанного предположения в ряде точек центральной зоны района разрушений (Северный торфяник, Южное болото, район горы Острой) были отобраны колонки торфа, подвергнутые в дальнейшем нейтронно-активационному анализу. Одна из них дала необычайно яркий эффект, послуживший поводом для представлений о химическом составе Тунгусского метеорита, его происхождении и эволюции малых тел Солнечной системы [47—49]. Наиболее четкие аномалии были отмечены для элементов, нетрадиционных для классических объектов метеоритики, — цинка, брома, рубидия, ртути, свинца — и наряду с этим — железа, кобальта и никеля. Было высказано мнение о том [44, 77], что поскольку всплески концентраций для большинства перечисленных элементов нельзя объяснить ни дополнительным привносом в торф терригенной пыли или золы сгоревших деревьев, ни проявлением местной биогеохимической аномалии, то наиболее вероятным является их космическое происхождение.

Наиболее важный вывод, который был сделан на основании этой серии работ, состоял в том, что вещество Тунгусского метеорита напоминает по своему составу углистые хондриты I типа. Однако даже по сравнению с ними в составе этого вещества обильнее представлены некоторые легколетучие литофильные и халькофильные элементы (щелочные металлы, цинк, бром, свинец, олово и молибден). Напротив, сидерофильные элементы (особенно никель и кобальт) содержат-

ся в нем в существенно меньших количествах. Состав и соотношения элементов в общих чертах согласуются с современными представлениями о составе продуктов поздних стадий конденсации и дифференциации протопланетного облака в его периферийной части. По мнению авторов [44, 77], вещество Тунгусского метеорита было генетически связано с веществом некоторых регулярных метеорных потоков, а также с углистыми хондритами, имело с ними общее прародительское вещество и являлось одним из первых продуктов его последовательной дифференциации. В целом эти результаты свидетельствуют о кометной природе Тунгусского космического тела.

Данные, полученные авторами работ [44, 77], очень интересны — особенно если учесть известное сходство между элементным составом силикатных шариков и аномалией, выявленной в слое торфа 1908 г. Следует, однако, сделать оговорку: все перечисленные, весьма значительные и далеко идущие выводы сделаны на основании анализа единственной колонки торфа, не подтвержденной соседними точками. При этом расположение точки отбора оставляет желать лучшего: она находится на расстоянии нескольких метров от Сусловской воронки и примерно в 100 м от Изб Кулика, т. е. в пределах территории, подвергающейся интенсивному антропогенному воздействию начиная с первых экспедиций Л. А. Кулика. В Избах Кулика неоднократно развешивались полевой лабораторный стационар, фото- и кинолаборатории и т. д., поэтому результаты [44, 77] должны рассматриваться, с нашей точки зрения, как предварительные и нуждающиеся в подтверждении пикетами, свободными от опасности антропогенных загрязнений.

Тем не менее есть серьезные основания полагать, что результаты, опубликованные в [44, 77], вряд ли могут быть объяснены только случайным загрязнением окружающей среды техногенными продуктами. Против такой их интерпретации свидетельствуют результаты цикла исследований изотопного состава свинца в эпицентральной области Тунгусского взрыва. Е. М. Колесников и Г. И. Шестаков [81] изучили изотопный состав свинца в тех же образцах, которые исследованы в [44, 77]. Оказалось, что по изотопному составу свинец из катастрофического слоя торфа отличается от свинца верхних и нижних слоев, обыкновенного свинца района катастрофы (траппов, почв) и свинца золы сгоревших деревьев обогащением изотопами  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и обеднением  $^{206}\text{Pb}$ . Из известных природных объектов ближе всего по изотопному составу к свинцу Тунгусского космического тела свинец железных метеоритов «стариковской» группы. Предположение о земном происхождении рассматриваемой аномалии отвергается на том основании, что только 1% обыкновенных земных свинцов попадает в область слева от геохроны, а остальные 99% расположены либо справа от нее в зоне обогащения изотопом  $^{208}\text{Pb}$ , либо непосредственно на геохроне.

Довод этот не совсем убедителен, так как то, что справедливо в отношении земных природных свинцов, может оказаться неприменимым к техногенным свинцам различного происхождения. Кроме того, авторы [1], используя аналогичный материал (катастрофный

слой торфа из эпицентральной области Тунгусского взрыва), обнаружили сдвиг в изотопном составе свинца, однако существенно иной, чем авторы [81]. Ситуация, таким образом, требует разъяснения, и с полной уверенностью говорить о наличии в эпицентре Тунгусской катастрофы космохимической изотопной аномалии по свинцу было бы преждевременным.

По нашему мнению, любое суждение о составе Тунгусского метеорита на основании единичных пикетов — даже при условии использования самой совершенной аналитической техники — содержит в себе большой элемент риска, и поэтому главный акцент в работах данного направления должен быть сделан на сочетании высокоточных методов анализа с площадной съемкой, исключающей или сводящей до минимума роль случайных факторов.

Таким образом, к 1979 г. работы, направленные на поиски вещества Тунгусского метеорита, привели к установлению следующих фундаментальных результатов.

1. На территории Тунгусской катастрофы были обнаружены зоны обогащения земной поверхности сферической фракцией аэрозолей, скорее всего космических, выпадение которых датируется началом XX столетия. Эта пыль имеет в основном силикатный состав, область ее распространения в первом приближении совпадает с областью обогащения почв магнетитовыми шариками, описанной в 1961 г. К. П. Флоренским, ее космогенность и связь с веществом Тунгусского метеорита вероятны, но окончательно не доказаны.

2. Сферическая фракция не является представительной компонентой Тунгусского космического тела. Объем ее по отношению к общей массе ничтожен, и поэтому судить о составе Тунгусского метеорита на основании ее анализа можно лишь с большой осторожностью.

3. Катастрофный слой торфа обогащен в районе падения рядом элементов, в том числе Zn, Pb, Co, I<sub>b</sub>, Ni, Mo; вопрос о природе этого эффекта неясен и нуждается в изучении.

4. В катастрофном слое присутствуют единичные алмаз-графит-лонсдейлитовые сростки предположительно космического происхождения.

5. Изотопный состав свинца из катастрофного слоя в некоторых точках района отличается как от современного, так и от докатастрофного, что может быть интерпретировано как результат выпадения космогенного свинца, входящего в состав Тунгусского метеорита.

6. Элементные нарушения в слое торфа 1908 г., равно как и химический состав силикатных сферул, позволили выдвинуть предположение о близости вещества Тунгусского метеорита к углистым хондритам CI, с одной стороны, и к кометам — с другой.

В своей совокупности эти неоднозначные результаты позволили поставить вопрос о наличии в районе падения Тунгусского метеорита космохимической изотопной аномалии. Поскольку изотопия является наиболее информативным критерием различия земного и космического материала [117], самое серьезное внимание в последние годы было обращено на исследование в районе катастрофы изотопного состава не только свинца, но и других элементов, входящих в со-

став углистых хондритов и комет, в частности водорода и углерода. Предварительные итоги этих работ отражены в [78, 93] и могут быть суммированы следующим образом:

1) относительное содержание  $^{14}\text{C}$  в катастрофном слое торфа понижено;

2) пониженное содержание  $^{14}\text{C}$  сочетается с изменениями соотношения  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ;

3) указанный слой торфа маркируется нарушениями соотношений стабильных изотопов водорода;

4) аномалии могут быть объяснены массивным выпадением до-биогенной органики, аналогичной по составу органике углистых хондритов.

Высказано предположение [43, 45], что выпадение кометного вещества — причина быстрого восстановления леса в районе катастрофы; специально проведенные модельные эксперименты показали, однако, что способность почв района Тунгусской катастрофы стимулировать рост растений положительно коррелирует с содержанием в них редкоземельных элементов [33], избыточного присутствия которых в кометах не доказано.

Итак, по данным о составе Тунгусского метеорита, имевшимся к концу 1981 г., наиболее вероятной казалась версия о том, что последний представлял собою космическое тело, занимавшее промежуточное положение между углистыми хондритами и кометами. Не противоречили такому заключению и материалы, полученные в ходе проводившихся на протяжении 70-х гг. работ по дальнейшей проверке версии ядерного взрыва. Эти исследования имели следующие направления:

1) уточнение данных о радиоактивности почв и растительности;

2) экспериментальная проверка гипотез аннигиляционного и термоядерного механизмов взрыва;

3) изучение мутационных эффектов;

4) продолжение работ по термolumинесценции минералов.

Необходимость в уточнении данных о радиоактивности почв района падения вытекала из неопределенности в трактовке результатов радиометрии, проведенной КСЭ еще в 1959—1960 гг. [74]. Л. В. Кириченко и М. П. Гречушкина, выполнявшие эту работу, объясняли некоторое повышение радиоактивности в центре района Тунгусской катастрофы локальными флуктуациями глобальных выпадений. Поскольку спектр выпадений характеризуется прежде всего короткоживущими радиоактивными изотопами, логично было ожидать, что площадная структура радиоактивности поверхностного слоя почвы, выявленная в Великой Котловине и ее окрестностях в 1959—1960 гг., к 1970 г. должна была или исчезнуть, или существенно измениться. В действительности не произошло ни того, ни другого: полевая радиометрия, проведенная повторно в 1969 г., не выявила принципиальных отличий по сравнению с 1959—1960 гг., что свидетельствовало о существенном вкладе в эффект долгоживущих радиоизотопов. Эти наблюдения послужили основанием для постановки в 1971 г.  $\beta$ -радиометрии почв района катастрофы в широком мас-

штабе. Результаты данной работы, выполненной под руководством А. Д. Аммосова [28], подтвердили наличие в окрестностях эпицентра Тунгусского взрыва зоны, характеризующейся повышенными значениями  $\beta$ -радиоактивности почв. Статистическая обработка Д. В. Деминым полученных в 1960 г. Л. В. Кириченко и М. П. Гречушкиной материалов по радиоактивности золы растений (голубики) [28] привела к тому же выводу. Таким образом, наличие в эпицентре Тунгусского взрыва зоны, характеризующейся небольшим повышением  $\beta$ -радиоактивности растительности и почв, сомнений не вызывает, однако связь указанного явления как с падением Тунгусского метеорита, так и с глобальным выпадением осадков не доказана. Не исключено, что оно объясняется особенностями распределения естественных радиоизотопов в подстилающих горных породах района: Великая Метеоритная котловина и окружающие ее сопки представляют собой остатки эродированного конуса триасового палеовулкана, геологический фон района пестр, а содержание урана в трапах близ эпицентра взрыва несколько выше, чем на периферии района [28].

До конца этот вопрос не решен. Смерть В. Н. Мехедова и Л. В. Кириченко существенно затормозила его дальнейшую разработку, и природа радиоактивности в эпицентре Тунгусского взрыва ждет еще своего объяснения.

Тесно связан с нею и вопрос о радиоактивности годичных колец деревьев, переживших Тунгусскую катастрофу вблизи ее эпицентра. Замеры  $\beta$ -радиоактивности золы таких деревьев, проведенные А. В. Золотовым [62], выявили в годичных кольцах, относящихся к эпохе Тунгусской катастрофы, небольшое превышение, которое А. В. Золотов склонен был интерпретировать как результат повышения концентрации в этом слое  $^{137}\text{Cs}$ . Как и предыдущий, данный вопрос до конца не решен. Есть основания думать, что эффект, описанный А. В. Золотовым, имеет косвенное отношение к событиям 1908 г. и представляет собой результат сорбции современных радионуклидов годичными кольцами древесины, механические и физико-химические свойства которой существенно изменены по сравнению с сопредельными слоями.

В 70-е гг. были продолжены исследования содержания в годичных кольцах древесины  $^{14}\text{C}$ . Исходной точкой этих работ послужила гипотеза об антивещественной природе Тунгусского метеорита Л. Лапаза [147], развитая К. Коуэном с соавторами [141] и обсуждавшаяся в ряде работ [42, 52, 101]. Большинство исследователей, участвовавших в этих работах, оперировали данными об изотопном составе углерода деревьев в районах земного шара, весьма удаленных от места падения Тунгусского метеорита (в Калифорнии, Индии и т. д.). При таком подходе циклические процессы, связанные с солнечной активностью, могли, естественно, сильно исказить картину.

Между тем, если допустить, что Тунгусский метеорит действительно имел антивещественную, а его взрыв аннигиляционную природу, то очевидно, что максимальный эффект по  $^{14}\text{C}$  должен наблюдаться именно в районе падения метеорита. Данное предположение проверили В. К. Журавлев и Л. В. Фирсов в 1972 г. [131], В. Д. Не-

светайло и Н. Н. Ковалюх в 1977 г. [101]. Итогом этих работ явились следующие выводы: 1) годовичные кольца 1909—1910 гг. характеризуются максимальным по сравнению со смежными содержанием  $^{14}\text{C}$  (этот эффект отмечается не только в районе падения Тунгусского метеорита, но и на севере Томской области); 2) 1908—1909 гг. представляют собой временную точку, отмеченную суперпозицией максимумов двух солнечных радиоуглеродных циклов — 11-летнего и векового. Следовательно, наблюдаемое явление можно было бы объяснить суперпозицией двух солнечных максимумов (обстоятельство, отношения к Тунгусскому метеориту не имеющее), если бы не один факт. Непосредственно в районе Тунгусской катастрофы указанный эффект наблюдается не у всех деревьев. В случае же связи его с солнечными циклами логичнее было бы ожидать выявления сплошной картины, не связанной с «особыми» точками района. Это обстоятельство не разъяснено и не позволяет пока считать указанный вопрос окончательно закрытым.

Другое направление работ, связанное исторически с ядерной гипотезой,— это изучение мутационного фона в районе эпицентра Тунгусского взрыва. Если действительно он имеет ядерную природу, наличие здесь мутационных аномалий более чем вероятно. (Удивительно, что сторонники ядерной версии так и не взяли это обстоятельство себе на вооружение.)

Первая попытка выявления нарушений естественного хода мутационного процесса в районе Тунгусской катастрофы была принята в 1963 г. Г. Ф. Плехановым. В 1963—1969 гг. был получен надежный морфометрический материал, послуживший фактической основой для расчетов с использованием математического аппарата популяционной генетики. Эти исследования, выполненные в 1973—1981 гг. КСЭ совместно с сотрудниками Института цитологии и генетики СО АН СССР [57], показали, что, во-первых, мутационный фон в районе эпицентра Тунгусской катастрофы повышен, во-вторых, максимум этого эффекта находится неподалеку от эпицентра взрыва.

Выявление данного обстоятельства, достоверность которого зависит от надежности оригинальных и пока еще не общепринятых популяционно-генетических алгоритмов, породило вопрос о его причине. Наиболее естественным представлялось объяснение эффекта действием канцерогенов-мутагенов, образующихся при сухой возгонке древесины во время лесного пожара. В таком случае границы области мутаций должны, очевидно, совпадать с контуром зоны лесного пожара 1908 г. Отсутствие между ними территориального совпадения свидетельствовало бы против причинно-следственной связи.

Исходя из этих соображений с 1973 г. КСЭ совместно с Институтом леса и древесины СО АН СССР были развернуты работы по оконтуриванию зоны лесного пожара 1908 г. Они представляли собой продолжение исследований, начатых в 1961 г. Н. П. Курбатским [90], который в составе экспедиции КМЕТ АН СССР на основе аэровизуальной съемки района и локальных наземных маршрутов ориентировочно оконтурил район лесного пожара 1908 г. Следует отметить, однако, что аэровизуальные оценки достаточно субъективны, а на-

земные маршруты, проложенные при участии Н. П. Курбатского, не выходили за пределы Великой Котловины. Поэтому определенные им границы необходимо было проверить более детальной наземной съемкой — в середине 70-х гг. она была проведена под руководством В. В. Фурьева. Ее итоги показали, что контуры области лесного пожара 1908 г. и мутационных эффектов не совпадают. Первая более обширна, имеет двулепестковую структуру и походит по форме на область вывала леса (хотя его площадь гораздо больше). Напротив, область распространения популяционно-генетических эффектов тяготеет к оси симметрии лесоповала, площадь его гораздо меньше зоны пожара, она не имеет двулепестковой структуры, максимум эффекта наблюдается в окрестностях горы Острой в месте пересечения траектории с земной поверхностью.

Мутационные исследования были продолжены на беспозвоночных животных (муравьях), обитающих в районе Тунгусской катастрофы. Работы, проводившиеся с 1969 по 1979 г. под руководством старшего научного сотрудника лаборатории лесной энтомологии Института леса и древесины СО АН СССР В. А. Дмитриенко, показали [27], что морфологические характеристики муравьев, живущих в точках максимума мутационного эффекта у сосны, и муравьев, обитающих в других зонах эпицентрального района, существенно различаются. Относить это к мутационным эффектам преждевременно, так как закономерности мутаций у муравьев не известны, методические подходы к их исследованию у колоннальных насекомых достаточно трудны.

Таким образом, имеются факты, позволяющие предполагать наличие в эпицентре Тунгусской катастрофы мутационных нарушений, контур зоны которых явно связан с геометрией Тунгусского взрыва. Вопрос о причинах ее возникновения остается открытым. Работы Е. М. Колесникова [79] по изучению изотопного состава инертных газов в почвах и горных породах района Тунгусской катастрофы дали отрицательный ответ на вопрос о возможности генерации нейтронного потока во время взрыва. Тем самым отрицается его аннигиляционная природа и нейтрогенная природа связанных с ним мутационных эффектов.

Проблематична ситуация и с другими видами физических мутagenов. По Т. Я. Гораздовскому [50], быстрое разрушение кристаллической решетки приводит к так называемому реологическому взрыву, сопровождающемуся генерацией жесткого  $\gamma$ -излучения. Эти эффекты действительно зарегистрированы в лабораторных условиях, но реальны ли они при разрушении тел, подобных Тунгусскому метеориту, неясно, тем более если учесть, что Тунгусский метеорит имел низкую плотность и рыхлую структуру. Кроме того, взрыв произошел на высоте около 5—6 км, и в этом случае жесткая ионизирующая радиация должна была экранироваться плотными слоями атмосферы. Поскольку ядерная природа взрыва маловероятна, исключается и возможность локального выпадения в 1908 г. радиоактивных осадков. Объяснение мутаций с позиций термических воздействий также не выдерживает критики по причинам, о которых уже было сказано выше.

В последнее время поднят вопрос о возможности объяснения этих эффектов ультрафиолетовым излучением, и здесь возможны три подхода. Согласно первому, в спектре Тунгусского взрыва присутствовала мощная ультрафиолетовая компонента. Такая возможность не исключена, однако пятикилометровая толща приземных слоев атмосферы должна была существенно ослабить этот эффект. Другая точка зрения, обоснованная [69], состоит в том, что пролет и взрыв Тунгусского метеорита вызвали прорыв озонового слоя и, как следствие, интенсивное локальное УФ-облучение района катастрофы Солнцем. Второй точке зрения следует, видимо, отдать предпочтение. Нарушение озонового слоя в момент Тунгусской катастрофы документировано данными обсерватории Маунт-Вильсон [150], поэтому локальное воздействие солнечного ультрафиолета высоковероятно, а его мутагенное влияние экспериментально доказано. Непонятно в этом случае следующее: по заключению дендрологов [10], восстановление леса в эпицентре Тунгусской катастрофы происходило за счет семян, сохранившихся не на поверхности почвы, а в ее глубине. Учитывая малую проникающую способность УФ-излучения, трудно понять, каким образом оно могло воздействовать на семена, находившиеся в таких условиях.

Третье объяснение гипотетично. В биологической литературе имеются указания на то, что электромагнитные возмущения могут играть роль физических мутагенов. В момент Тунгусского взрыва, судя по электрофонным явлениям [8], они имели место и рассчитаны В. Ф. Соляником [118]. Однако сама мутагенность электромагнитного поля остается пока не доказанной.

Таким образом, хотя причина мутационных явлений в районе эпицентра Тунгусского взрыва не объяснена, это не может быть аргументом в пользу его ядерной природы.

Итак, с 1970 по 1980 г. продолжались выявление, сбор и исследование вещества Тунгусского метеорита. Были получены новые данные об элементных и изотопных аномалиях в районе его падения. Наиболее достоверные сведения относятся к сферической фракции космического аэрозоля, т. е. к ничтожно малой и наименее представительной части вещества Тунгусского космического тела, едва ли составляющей тысячные доли процента его массы.

Характер изотопных аномалий в эпицентральной области Тунгусского взрыва не исключает предположения о распылении над ней больших масс углеродистого материала. В совокупности с элементным составом шариков, близким к углистым хондритам, это свидетельствует о возможном родстве Тунгусского метеорита с кометами, с одной стороны, и с углистыми хондритами I типа — с другой.

К этому заключению привели и расчетные работы по физике Тунгусского взрыва, проведенные в течение 1970—1980 гг. гидродинамиками и специалистами в области математического моделирования взрывов — Г. И. Петровым и В. П. Стуловым [105, 106], В. П. Коробейниковым, П. И. Чушкиным и Л. В. Шуршаловым [83, 84], Г. А. Тирским [5] и С. С. Григоряном [51], В. А. Брон-



штэном и А. П. Бояркиной [11, 12, 19]. При всем различии в методических подходах, исходных допущениях и интерпретации полученных данных они единодушны в выводе о низкой плотности Тунгусского метеорита, что соответствует представлениям о физических свойствах комет. Такой подход позволяет интерпретировать огромную энергию и надземный характер Тунгусского взрыва как результат перехода кинетической энергии в тепловую в ходе быстрого торможения метеорита в плотных слоях атмосферы Земли. Наряду с этим на протяжении 70-х гг. наметилась тенденция к повышению оценки тротилового эквивалента Тунгусского взрыва до 10 и даже 40 Мт. Сказанное относится к работам И. П. Пасечника [103] и А. Бен-Менахема [137], проводивших повторную, после 30-х гг. [8, 121], обработку сейсмо- и барограмм Тунгусского взрыва, а также В. А. Бронштэна [11, 12], внесшего поправки на градиент плотности атмосферы.

В этот период был получен важный результат. В. П. Коробейников с соавторами [82] установили, что взрывоподобное разрушение крупных метеорных тел в атмосфере Земли приводит к переходу в излучение кинетической энергии, составляющей единицы и даже десятки процентов от общей суммы энергии взрыва. Тем самым был взят под сомнение один из главных аргументов сторонников ядерной гипотезы Тунгусского взрыва — необычно высокая (10% и более) доля световой энергии в его энергетическом балансе. В тот же период получило новое подтверждение [84] высказанное ранее И. Т. Зоткиным и М. В. Цикулиным [66, 135] представление о крутом (более 30°) угле наклона траектории метеорита. Казавшиеся несовместимыми взгляды В. А. Бронштэна [11] о пологом и В. П. Коробейникова [84] о крутом угле наклона траектории в какой-то мере сняты расчетами [85], показавшими, что угол наклона мог меняться благодаря азродинамическому качеству («клевок» в конце полета) Тунгусского космического тела. Эти же исследования подтвердили высокую вероятность «рикошета» остатков Тунгусского тела, след которого, возможно, и представляют собой осесимметричные отклонения векторов повала леса в «голове» «бабочки» вывала.

Таким образом, к 1979—1980 гг. были получены новые данные как о физике Тунгусского взрыва, так и о материальном составе метеорита. Для их интерпретации немаловажную роль сыграли пролет и взрыв над Канадой дневного болида Ревелсток [140, 142], который вызвал комплекс явлений, в миниатюре воспроизводивших Тунгусский феномен, и оказался углистым хондритом, взорвавшимся и распылившимся в атмосфере. Кроме того, в результате работ Прерийной болидной сети (США), выявился неожиданно высокий процент крупных болидов, пролет которых в атмосфере Земли заканчивается не выпадением метеорита на Землю, а его взрывом при входе в тропосферу. Обсуждение этих фактов привело к заключению, что значительная часть крупных метеоритных тел имеет рыхлую структуру и принадлежит к образованиям, промежуточным между кометами и углистыми хондритами, — «кометоидам» [18]. Было высказано предположение [18], что Тунгусский метеорит связан с

разрушением в атмосфере Земли рыхлых метеоритных тел, близких к углистым хондритам.

В течение 1970—1980 гг. фактические данные о Тунгусском метеорите изменились или дополнились.

1. В районе Тунгусского падения была описана элементарно-изотопная аномалия, маркированная сдвигами в изотопном составе свинца, водорода и углерода.

2. В торфах эпицентральной области Тунгусской катастрофы обнаружены сростки углеродистого алмаз-графитового материала, имеющего также, по-видимому, космическое происхождение.

3. Завершение площадной съемки, ориентированной на количественную оценку метеоритных шариков в катастрофном слое сфагновых торфов междуречья Подкаменной Тунгуски и Чуни, позволило выявить на этой территории три области выпадения космогенного аэрозоля 1908 г.: центральную (в окрестностях Изб Кулика); северо-западную (в районе пос. Муторай), представляющую собой, вероятно, шлейф рассеивания вещества Тунгусского метеорита, и северо-восточную (в верховьях р. Чупя), связанную, возможно, с оседанием пылевого хвоста болида. Результаты съемки позволили сделать однозначный вывод о том, что сферическая фракция космического вещества, выпавшего во время Тунгусской катастрофы, составляла малые доли процента от его общей массы.

4. Были получены ориентировочные данные о распределении на территории района катастрофы мелкодисперсной остроугольной силикатной фракции космического материала, маркированного скловым  $^{14}\text{C}$ .

5. Удалось выявить и оконтурить зону мутационных эффектов, связанных с пролетом и взрывом Тунгусского космического тела, установить принципиальное отличие ее геометрии от зон пожара, лучистого ожога и вывала.

6. На основании анализа изотопного состава благородных газов в почвах и горных породах района катастрофы был сделан отрицательный вывод относительно аннигиляционной или термоядерной природы Тунгусского взрыва.

7. Методами машинного моделирования Тунгусского взрыва была обоснована возможность рикошета Тунгусского космического тела с подкреплением анализом векторной структуры западно-северо-западного сектора района повала леса (выявление несимметрических отклонений векторов в области продолжения оси симметрии площади вывала).

8. Была доказана неоднородность геологического фона района катастрофы, связанная с наличием в эпицентре взрыва разрушенного конуса триасового палеовулкана.

9. Были суммированы и обобщены в форме каталога данные опросов очевидцев пролета и падения Тунгусского метеорита.

10. Сопоставление всего фактического материала об обстоятельствах Тунгусской катастрофы с явлениями, наблюдавшимися при пролете болида Ревелсток, и с данными Прерийной болидной сети позволило сделать принципиально важный вывод о близости

Тунгусского космического тела к углистым хондритам I типа.

Таким образом, была внесена определенная ясность в трактовку ряда принципиальных моментов Тунгусской катастрофы. Вместе с тем обнаружились и серьезные трудности, стоящие на пути создания универсальной модели явлений, связанных с этим событием.

Речь идет, прежде всего, о парадоксах, вытекающих из сопоставления свидетельских показаний о пролете и взрыве Тунгусского космического тела с объективной картиной разрушений на местности. Анализ всей совокупности опросных материалов, проведенный по данным [32], позволил сделать вывод о том, что восточно-юго-восточный вариант траектории, предложенный в середине 60-х гг., находится в явном противоречии с наиболее надежными и многочисленными показаниями очевидцев, проживавших в 1908 г. в среднем течении р. Ангара, и в частности в Кежме. Известно [87], что в этой зоне Тунгусский болид наблюдался на угловой высоте порядка  $28^\circ$  (примерно на уровне Солнца, которое в 7 ч утра по местному времени 30 июня находится именно в таком положении). Простой геометрический расчет показывает, что совмещение этих данных с траекторией, азимут которой составляет  $114$  и тем более  $95^\circ$ , приводит к парадоксальному заключению о нереально большой (порядка нескольких сотен километров) высоте возгорания Тунгусского болида. Этот парадокс остался непреодоленным и после того, как показания очевидцев из верховьев Нижней Тунгуски (пос. Преображенка, Нэпа, Ербогачен и др.) после детального анализа [53] были отнесены к какому-то другому дневному болиду, отмеченному примерно в тот же период времени (следует заметить, что лето 1908 г. было необычайно богато болидами [4]). Дело в том, что восточно-юго-восточный вариант траектории был вычислен не столько по свидетельским показаниям, сколько на основании отождествления осей симметрии областей вывала леса и лучистого ожога растительности. На этот парадокс указывал Ф. Ю. Зигель [60, 61], на то же обстоятельство обращал внимание и И. С. Астапович [9]. С полной очевидностью, однако, вопрос возник после того, как создание полной сводки свидетельских показаний сделало возможным обозрение их во всей совокупности.

Объективное существование парадокса не подлежит сомнению. В связи с этим были предприняты попытки его объяснения с различных точек зрения.

Ф. Ю. Зигель [61] предположил, что Тунгусское тело маневрировало в атмосфере Земли не только в вертикальной плоскости (что в принципе возможно и для метеорных объектов естественного происхождения [85]), но и в горизонтальной. Последнее автоматически ведет к признанию искусственной природы Тунгусского метеорита, что необоснованно: никаких прямых доказательств искусственной природы Тунгусского метеорита нет. Кроме того, ни один из более чем 700 очевидцев Тунгусской катастрофы, показания которых собраны в [32], не отметил «маневра» как такового.

Действительно, если отвлечься от соображений о траектории, основанных на анализе осей симметрии областей вывала леса и ожо-

га, и вернуться к старому варианту траектории, предложенному Е. Л. Криновым [87], парадокс видимости болида на высоте 28° в Кежме снимается. Остается, однако, непонятной интуитивно очевидная связь оси симметрии областей разрушений с проекцией траектории метеорита.

По-видимому, эти противоречия можно было бы снять, пойдя по пути компромиссного решения вопроса. То, что ось симметрии вывала причинно связана с траекторией, более чем вероятно. Однако отсюда не следует необходимость их отождествления. В ряде публикаций, обсуждающих вопрос о механизме нарушений, вызванных воздушной волной Тунгусского метеорита, указывается на возможность серьезной ее деформации за счет привходящих факторов, в частности за счет стратосферного ветра [86, 123]. Признав это, можно объяснить противоречие следующим образом. Ось симметрии вывала действительно связана с траекторией полета метеорита. Однако фактическая проекция траектории на поверхность Земли с осью симметрии вывала не совпадает, ибо последняя представляет собой не прямое отражение траектории, а скорее отражение формы ударной волны. Ее пространственное положение могло быть изменено; сдвинуто стратосферным ветром или какими-либо иными локальными условиями, вызвавшими поворот фронта ударной волны в направлении, противоположном часовой стрелке, что и сформировало восточную «псевдотраекторию». Такая трактовка представляется нам более вероятной. Следует подчеркнуть, однако, что расчетами она не подкреплена, и в этом направлении предстает еще большая работа.

В последнее время была предпринята еще одна попытка объяснить парадоксально большую высоту «возгорания» Тунгусского болида [75]. Авторы ее выдвигают предположение о том, что высота видимости Тунгусского космического тела и высота его возгорания — это совершенно разные понятия. По мнению авторов [75], ядро Тунгусской кометы имело высокое альbedo, свойственное вообще льдам, и в силу этого интенсивно отражало лучи восходящего Солнца. Поэтому видимость Тунгусского болида оказывается не связанной с высотой его возгорания: высота могла быть «обычной», т. е. 120—140 км, в то время как наблюдатели могли видеть Тунгусское космическое тело на подлете до его возгорания. Эта точка зрения не может быть априорно исключена, однако требует проверки и доказательств, так как альbedo кометных льдов до настоящего времени окончательно не определено.

Указанный парадокс — это одна из основных трудностей в комплексной интерпретации событий 30 июня 1908 г., определяющих главное направление работ на ближайшие годы. Очевидно, что для его преодоления необходимы серьезные расчеты, которые позволили бы дать исчерпывающий ответ на вопрос: каким образом можно совместить реальный (скорее всего, юго-восточный, близкий к определенному Е. Л. Криновым) вариант траектории с осью симметрии области разрушений, пеленгующей движение тела с востоко-юго-востока.

Эта трудность не единственная. Другая — в определении вещества Тунгусского метеорита. До настоящего времени в распоряжении исследователей отсутствует космический материал, который безоговорочно и с полной уверенностью можно было бы квалифицировать как остатки взорвавшегося 30 июня 1908 г. метеорного тела. Это создает благоприятную почву для генерации экстравагантных гипотез, имеющих подчас спекулятивный характер.

Третья трудность состоит в том, что ни одна из предложенных гипотез о природе Тунгусского метеорита не объясняет удовлетворительным образом комплекс атмосферных аномалий 30 июня — 2 июля 1908 г. Относительно его игнорирования сторонниками ядерной версии уже говорилось выше. Необходимо добавить, что и кометная гипотеза эти явления удовлетворительно не объясняет. В. Г. Фесенков [127—129], связывавший их с воздействием на атмосферу Земли кометного хвоста, неоднократно подчеркивал, что последний должен был задержаться на высоте более 200 км и в силу этого не мог оказать влияния на процессы, происходящие в ионосфере, а тем более на нижележащие слои атмосферы. Между тем фактический материал не оставляет сомнений в том, что область генерации оптических аномалий охватывала всю толщу атмосферы, по крайней мере до высоты 40 км, даже если пренебречь гало, наблюдавшимися в те дни в различных точках северного полушария [102]. Вряд ли это обстоятельство является, однако, для кометной гипотезы «губительным». Как ни странно, но до сих пор при интерпретации атмосферного оптического комплекса 30 июня — 2 июля 1908 г. не принималась во внимание кома Тунгусской кометы. Последняя же, несомненно, должна иметь радиус в десятки, если не в сотни километров, причем плотность содержащейся в ней пылевой материи должна была превышать плотность пыли в кометном хвосте на несколько порядков. Именно внесение в атмосферу Земли вещества кометной комы могло, по-видимому, вызвать значительно большее по величине и более глубокое запыление атмосферы, чем вторжение одного лишь кометного хвоста.

Следует учитывать и еще одно немаловажное и в какой-то мере странное обстоятельство. Известно, что плотность золя, входящего в состав хвоста комет, ничтожно мала по сравнению с плотностью атмосферных аэрозолей, даже если речь идет о верхних слоях атмосферы Земли. Между тем каждое прохождение Земли через хвосты комет приводило к возникновению достаточно интенсивных оптических атмосферных аномалий. Это подтверждено наблюдениями, проведенными в мае 1910 г., в момент соприкосновения Земли с хвостом кометы Галлея [102], и в 1861 г. [39], когда наша Земля (по удивительному совпадению также 30 июня) соприкоснулась с хвостом крупной кометы. Сходство наблюдавшихся в этих случаях явлений с атмосферным оптическим комплексом 1908 г. поразительно — оно настолько велико, что М. Вольф, наблюдавший эти явления в Гейдельберге в 1910 г., ничего не зная о Тунгусском взрыве, в переписке с К. Фламарионом обращал внимание на сходство явлений 1910 и 1908 гг. и высказал предположение о том, что в июне

1908 г. Земля вошла в соприкосновение с кометным веществом [102, с. 95—96]. Объяснить это простым запылением атмосферы Земли зольной составляющей кометных хвостов явно не удастся. Остается допустить одно: ничтожные по своей массе золи кометных хвостов обладают какой-то пока непонятной, но удивительной по своей силе реакционной способностью, позволяющей им возбуждать интенсивные, скорее всего ионизационные процессы. В совокупности с данными о «всплесках» рентгеновского излучения при вхождении в атмосферу Земли некоторых метеорных потоков это обстоятельство заслуживает серьезных размышлений.

Таким образом, все данные о Тунгусском метеорите на 1980 г. свидетельствуют о том, что Тунгусское космическое тело являлось кометой или близким к кометам образованием. И в то же время эта совокупность сведений утверждает в мысли о том, что наши знания об истинной природе комет ограничены. И в этом смысле дальнейшая работа по изучению природы Тунгусского феномена представляется принципиально важной: речь идет не просто об изучении некоего исключительного, пусть даже уникально масштабного, события, а об исследовании природы комет, познание которой, в свою очередь, является ключом к пониманию эволюции Солнечной системы, планетных систем вообще и связанной с этим проблемы возникновения жизни в планетарно-звездных системах. Понимание указанного обстоятельства дает право на ответственный вывод о том, что решение проблемы Тунгусского метеорита объективно означает решение одной из фундаментальных проблем современного естествознания в целом.

Отсутствие космического вещества в районе Тунгусской катастрофы объясняется одной из пяти причин, которые, впрочем, не являются удовлетворительными:

1) космическое вещество в районе катастрофы есть, и в большом количестве, но состав его необычен. В силу этого методы, ориентированные на поиски традиционного метеоритного материала, малоэффективны;

2) вывал леса в районе Тунгусской катастрофы имеет к ней прямое отношение, но падение метеорита произошло в другом районе;

3) метеорит в районе Куликовских Изб не только не падал, но и не пролетал; сам вывал леса никакого отношения к событиям 30 июня 1908 г. не имеет, и все полевые работы, начиная с экспедиций Л. А. Кулика, — это цепь ошибок;

4) разрушения лесного массива произведены не за счет перехода кинетической энергии метеорита в энергию ударной волны, а за счет внутренней его энергии, скорее всего ядерной; в силу этого поиски космического вещества в указанном районе бессмысленны;

5) Тунгусский феномен имел не космическую, а земную природу и представлял собою результат земных событий, например извержения вулкана в районе Южного болота, взрыва облака метана или полета шаровой молнии.

Эти причины выдвигались на протяжении истории изучения Тунгусского метеорита неоднократно, фигурировали они и в начале 70-х гг., поэтому при определении стратегии работ приходилось считаться с их наличием. Некоторые из них заведомо абсурдны, но они возникают на страницах прессы, особенно научно-популярной, с таким упорством, что необходимо учитывать их резонанс в широких кругах читателей, ибо проблема Тунгусского метеорита с самого начала вышла за пределы академических аудиторий.

Ниже мы попытаемся проанализировать эти причины в порядке нарастания степени их достоверности.

Предположение о земном происхождении Тунгусского феномена (см., например, [65, 88, 120]) следует полностью исключить. Оно является результатом либо недоразумения, либо незнания реальных обстоятельств. В частности, длительное обследование района падения, выполненное в 1959—1961 гг. болотоведами [96, 97, 130] и в 1973—1974 гг. палеовулканологами [112], полностью исключают там как современную вулканическую деятельность, так и метанообразование в сколько-нибудь значительных масштабах. Точно так же анализ метеорологической обстановки 30 июня 1908 г. в Западной и Центральной Сибири возводит предположение о пролете над Красноярским краем шаровой молнии в ранг фантастики [40, 76]. Не подтвердились и высказывавшиеся неоднократно [7, 8, 56, 111] предположения относительно падения частей Тунгусского метеорита в других, помимо междуречья Хушмо и Кимчу, районах Сибири. Буреломы в бассейне р. Кеть, близ пос. Максимкин Яр и Усть-Озерное, принятые П. Л. Дравертом [56] за следы Тунгусской катастрофы, оказались, как выяснилось во время полевых работ КСЭ в 1960 и 1963 гг., следами крупных ветровалов [38, 95]. Кроме того, примерно 100 лет назад, в конце XIX столетия, произошло крупное метеоритное падение в бассейне р. Сым [122], устные предания о котором также должны учитываться при интерпретации опросов местного населения, проведенных на Обь-Енисейском подоразделе.

Менее определенной оказалась ситуация с так называемым восточным вывалом — гипотетическим вторым районом разрушений, вызванных Тунгусским падением. Известно, что предположение о существовании этого района было выдвинуто И. С. Астаповичем [7] со слов П. Н. Липая, заместителя начальника экспедиции, обследовавшей в 1911 г. фарватер Нижней Тунгуски. Начальником ее был В. Я. Шишков, впоследствии крупный советский писатель, работавший тогда в Томске, в Управлении водных и шоссейных путей. Известно, что эта экспедиция едва не погибла, вмерзнув в лед близ устья р. Илимпея в сентябре 1911 г., при неудачной попытке пройти сплавом за один сезон водный маршрут Ербогачен — Туруханск. В ноябре 1911 г., следуя оленьим караваном из устья р. Илимпея в с. Кежда на Ангаре, отряд В. Я. Шишкова пересек район разрушений, вызванных Тунгусским взрывом. Однако, как сообщил П. Н. Липай, произошло это не на междуречье Хушмо — Кимчу, а в бассейне р. Тэтэрз, примерно в 100 км восточнее района заимки Кулика.

Проверка версии П. Н. Липая — И. С. Астаповича проводилась в несколько этапов. В 1959—1960 гг. во время КСЭ-1 и 2 проводились целенаправленные опросы местных жителей, в 1960 г. бассейн р. Тэтэрэ и прилегающие к нему места были обследованы аэровизуально, зимой 1960—1961 гг. был изучен личный архив В. Я. Шишкова, хранящийся в Москве. Результаты этого этапа работ, освещенные в [59], позволили заключить, что экспедиция В. Я. Шишкова равновероятно могла выйти с устья Илимпеи в Ванавару как через бассейн р. Тэтэрэ (по так называемой Юктинской дороге), так и по Чунскому зимнику. В последнем случае она должна была неизбежно пересечь северо-восточный выступ области повала леса в районе Куликовских Изб. Аэровизуальные наблюдения однозначного результата не дали, так как бассейн р. Тэтэрэ и междуречья Тэтэрэ и Южной Чуни пройдены в конце 20-х гг. крупными верховыми пожарами, которые могли уничтожить или серьезно повредить восточный вывал, если он существовал.

В 1974, 1980, 1981 гг. экспедиционными отрядами КСЭ под руководством А. П. Бояркиной были опрошены старожилы [70] и проведено наземное обследование. В 1980-х гг. И. П. Пасечник [104] на основании современных данных о проводимости сейсмических волн в районе междуречий Чуны — Подкаменная Тунгуска и Подкаменная Тунгуска — Ангара уточнил центр генерации сейсма 30 июня 1908 г. В результате этих исследований установлено, что чего-либо, соизмеримого по масштабу со взрывом в районе заимки Кулика, на междуречье Тэтэрэ и Южной Чуни не происходило. Следов вывала, которые могли бы быть достоверно отнесены к действию пролета и взрыва Тунгусского метеорита, в этом районе не обнаружено, а экспедиция В. Я. Шишкова, вероятнее всего, пересекла на своем пути северо-восточный выступ повала леса, описанного Л. А. Куликом.

Таким образом, восточного вывала, эквивалентного по масштабам Куликовскому, не существует и, вероятно, не существовало.

Помимо восточного вывала с 1959 г. в литературе по Тунгусскому метеориту упоминается западный вывал [111], расположенный на хр. Чувар, в верховьях р. Хушмо, в 27 км западнее Изб Кулика. Предположение о его связи с падением метеорита [111] основано на свидетельских показаниях очевидцев [32] и на результатах полевых работ КСЭ в 1959, 1964, 1970 и 1971 гг. С другой стороны, комплексная группа, в состав которой входили Г. Ф. Плеханов, А. В. Золотов и ряд других участников экспедиций КМЕТ АН СССР, КСЭ и Волго-Уральский филиал НИИ Геофизики, осенью 1961 г., после обследования западного вывала, пришла к заключению о том, что последний представляет собой след верхового пожара, происшедшего в начале столетия, и с Тунгусской катастрофой не связан.

Вопрос этот остается до конца не выясненным, однако его решение не может существенно отразиться на общей стратегии работ, так как площадь западного вывала несоизмеримо мала по сравнению с площадью вывала на междуречье Чамбы и Кимчу.



Относительно связи землетрясения 30 июня 1908 г. в енисейской тайге (район р. Бол. Пит) с падением Тунгусского метеорита [6] мало что известно. Предпринятые в середине 60-х гг. А. Г. Ильиным (КСЭ) опросные работы в этом районе к определенным результатам не привели.

Описанная на основании опросов очевидцев И. М. Сусловым [119] «Сухая речка» на Лакуре, которая, как полагали, являлась бороздой, прорытой метеоритом при падении в районе Лакурского хребта, представляет собой, по данным полевых работ КСЭ в 1967 г., чисто естественное геоморфологическое образование, не связанное с Тунгусской катастрофой.

Таким образом, разрушенный 30 июня 1908 г. на междуречье Чамбы и Кимчу лесной массив является единственным достоверно установленным районом, связанным с падением Тунгусского метеорита. Никаких сколько-нибудь убедительных данных о существовании других районов разрушений, соизмеримых по масштабам с районом Куликовского повала, нет. Поэтому стратегия работ, ориентированная именно на данный район, была и остается полностью обоснованной.

Что касается попыток объяснения Тунгусской катастрофы за счет внутренней энергии тела, в том числе химической и ядерной, то они предпринимались неоднократно и до 1970 г., и после. О некоторых из них мы уже говорили (гипотезы ядерного взрыва А. П. Казанцева — Ф. Ю. Зигеля — А. В. Золотова, антивещественной природы метеорита Л. Лапаза и К. Коуэна), о других следует сказать дополнительно.

Так, в 1973 г. А. Джексон и М. Риан [146] попытались обосновать концепцию о том, что Тунгусский метеорит был черной микродырой, масса которой составляла  $10^{14}$  т (!) при субмикроскопических размерах. Это тело, по мнению авторов данной гипотезы, пронзило навывлет земной шар, причем «вход» его имел место в районе Куликовской заимки, а «выход» — в Атлантическом океане, в районе северо-восточного побережья Канады. Версия черной дыры вызвала дискуссию на страницах научной прессы [139, 145], причем оживленно обсуждался вопрос о том, правомерно такое предположение с позиций общей релятивистской теории или нет; создается впечатление, что некоторых участников дискуссии больше интересовали абстрактно-физические задачи, чем соответствие модели конкретной ситуации.

Между тем совершенно очевидно, что она не выдерживает даже снисходительной критики и к проблеме Тунгусского метеорита отношения не имеет. Дело в том, что комплекс звуковых и световых явлений, не говоря о барических, сейсмических и геомагнитных, должен был наблюдаться не только на входном, но и на выходном участке траектории, в непосредственной близости от побережья Северной Америки, — в частности, должны были иметь место цунами. Фактический материал 1908 г. показывает, что никаких катастрофических явлений в рассматриваемый период в районе Северной Америки не происходило.

Особо следует сказать о ядерной версии Тунгусского взрыва. В отличие от других, нейтральных, версий к 1970 г. она оформилась в научную гипотезу, претендующую на всестороннее объяснение явлений, связанных со взрывом Тунгусского метеорита. В полном виде относящаяся сюда аргументация изложена в монографии А. В. Золотова [63]. Эта книга вызвала новое обострение дискуссии о природе Тунгусского метеорита. Не останавливаясь на ней, отметим, что ядерная гипотеза по состоянию на 1970 г. имела ряд серьезных недостатков, из которых наиболее существенным явилась ее несостоятельность при интерпретации «светлых ночей» 1908 г.

Таким образом, в 1970—1971 гг. какие бы то ни было основания для того, чтобы положить в основу генеральной стратегии дальнейших исследований нетривиальные гипотезы, отсутствовали, хотя проверка концепции А. В. Золотова предусматривалась на всех этапах планируемых на будущее работ.

При обсуждении вопроса о том, мог ли метеорит вызвать повал леса, упав в другом месте или вылетев вновь за пределы земной атмосферы, нужно отметить следующее. Предположение о том, что Тунгусский метеорит мог, вызвав разрушения в районе Куликовских Изб, пролететь дальше по ходу траектории, выдвигалось неоднократно [9, 98]. Возможность прохождения крупных метеорных тел через атмосферу Земли по касательной документирована спутниковой аэрофотосъемкой [136, 138, 145, 149]. Поэтому исключать а priori такую возможность для Тунгусского метеорита было бы неправильно. Косвенные аргументы в ее пользу имелись, как выяснилось позднее, в работе В. Г. Фаста с соавторами [125], содержащей каталог сведений о векторных и скалярных характеристиках повала леса, вызванного воздушной волной Тунгусского метеорита. Обработка этих данных [124] действительно выявила в области продолжения траектории за эпицентр осесимметричные отклонения — слабые, но статистически достоверные, которые логичнее всего интерпретировать как след баллистической волны или, иными словами, как след рикошета. Тем не менее, даже если допустить возможность рикошета остатков Тунгусского метеорита, общая физическая картина вызванных им разрушений, выявленная к началу 1971 г., позволяла уверенно говорить о том, что сброс большей части массы имел место именно в районе повала леса, описанного Л. А. Куликом. Для Тунгусского болида рикошет возможен и теоретически рассчитан [85, 134].

Каковы же в свете сказанного перспективы изучения Тунгусского метеорита на ближайшие годы? По-видимому, как и в предыдущее десятилетие, ключевыми останутся работы, ориентированные на изучение космохимической элементно-изотопной аномалии в районе Тунгусской катастрофы. Есть все основания думать, что эти исследования, сколь бы сложны и трудоемки они ни были, позволят в конечном счете дать ответ на вопрос о материальном составе Тунгусского космического тела, а следовательно, о его природе и месте среди тел Солнечной системы. Указанные изменения должны сочетаться, во-первых, с работами в области натурального и математиче-

ского моделирования физических процессов, сопровождающих вторжение в атмосферу планет крупных метеорных тел, и, во-вторых, с изучением космофизических связей атмосферных оптических аномалий. В последнем случае многое зависит от прогресса в понимании природы мезосферных облаков, физических процессов генерации свечения ночного неба и механизма возникновения зоревых и поляризационных эффектов.

Вспомогательную на данном этапе развития событий, но, возможно, масштабную в перспективе роль могут сыграть неожиданности, связанные потенциально с биологическими эффектами в районе Тунгусской катастрофы. До настоящего времени их изучение не внесло существенного вклада в понимание физической сущности Тунгусского феномена. Между тем биологические эффекты реально существуют, и этот факт заставляет предполагать наличие обширной «зоны неожиданностей», прогнозировать развитие которой пока очень трудно. Не исключено, что именно раскрытие механизмов биологических последствий Тунгусского взрыва заставит пересмотреть взгляды и на их механизм, и на природу явления в целом.



История исследования Тунгусского метеорита измеряется уже более чем шестью десятилетиями. Она насыщена событиями и является собой яркий пример эволюции научных представлений от простого к сложному. Последняя страница ее еще не написана, и вряд ли это случится в ближайшие годы: как всегда бывает при разработке крупной научной проблемы, решение одного вопроса ведет к постановке новых, нередко еще более масштабных задач. Тунгусский метеорит — это не частный научный вопрос, а именно проблема, ибо от решения ее будет во многом зависеть ближайшая, а может быть, и отдаленная перспектива изучения эволюции кометно-метеорной материи Солнечной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева К. Н., Васильев Н. В., Ковалюх Н. Н. и др. Свинец из торфов в районе Тунгусского явления. — В кн.: Космическое окружение и Земля. Киев: Наук. думка, 1977, с. 125—128.
2. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В. и др. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 19—24.
3. Альтов Г., Журавлева В. Путешествие к эпицентру полемики. — Звезда, 1964, № 12, с. 130—138.
4. Анфиногенов Д. Ф., Будаева Л. И. Болиды лета — осени 1908 г. в средних широтах Евразии в связи с проблемой Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 22—29.
5. Ашштейн Э. З., Вартанян Н. В., Пилогин Н. Н., Тирский Г. А. Движение и испарение метеорных частиц в атмосферах Земли, Марса и Венеры. — В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 117—128.
6. Астапович И. С. Землетрясение 30 июня 1908 г. в Енисейской тайге в связи с падением Тунгусского метеорита. — Природа, 1948, № 1, с. 86—87.

7. Астапович И. С. Впечатление первых европейцев о буреломе Тунгусского метеорита. — Природа, 1948, № 5, с. 26—27.
8. Астапович П. С. Большой Тунгусский метеорит. — Природа, 1951, № 2, с. 23—32; № 3, с. 13—23.
9. Астапович П. С. К вопросу о Тунгусском метеорите. — В кн.: Исследования метеоров. М.: Наука, 1966, № 1, с. 152—155.
10. Бережной В. Г., Драпкина Г. П. Изучение аномального прироста леса в районе падения Тунгусского метеорита. — Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 162—169.
11. Бояркина А. П., Бронштэн В. А. Об энергии взрыва Тунгусского метеорита и учете неоднородности атмосферы. — Астроном. вестник, 1975, т. IX, № 3, с. 172—178.
12. Бояркина А. П., Бронштэн В. А., Станюкович А. К. Нестационарные взаимодействия ударных волн в газодинамических задачах метеоритики. — В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 138—156.
13. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Ваулин П. П. и др. К оценке выпадения космической и пылеобразной пыли на больших площадях. — В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 4. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 45—53.
14. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Ваулин П. П. и др. К оценке притока силикатной метеорной пыли на поверхность Земли. — В кн.: Материалы Четвертой научной конференции по математике и механике. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 120—121.
15. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Меняйцева Т. А. и др. К оценке вещества Тунгусского метеорита в районе эпицентра взрыва. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 8—15.
16. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Назаренко М. К. О притоке метеорной материи на Землю. — В кн.: Тезисы докладов, представленных на симпозиум «Взаимодействие космической пыли с атмосферой», 8—11 октября 1974 г., Ашхабад. М., 1974, с. 8—9.
17. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Назаренко М. К. Количественный анализ сферических микрочастиц по материалам сбора их в сфагновых торфах. — Метеоритика, 1976, вып. 35, с. 69—72.
18. Бронштэн В. А. Тунгусский метеорит и болиды Прерийной сети. — Астроном. вестник, 1976, т. X, № 2, с. 73—80.
19. Бронштэн В. А., Бояркина А. П. Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 47—63.
20. Бурмин Ю. А. Алмазы, которые есть везде. — Природа, 1983, № 11, с. 46—51.
21. Васильев Н. В. Состояние проблемы Тунгусского метеорита на начало 1974 г. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 3—12.
22. Васильев Н. В. Проблемы Тунгусского метеорита. — Земля и Вселенная, 1975, № 1, с. 29—35.
23. Васильев Н. В. Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблемы астрономии и геодезии. М., 1977, с. 88—106.
24. Васильев Н. В. Послесловие к книге Б. И. Вронского «Тропой Кулика». — М.: Мысль, 1977, с. 210—220.
25. Васильев Н. В., Вронский Б. И., Демин Д. В. и др. Спалканные сферулы в торфах района падения Тунгусского метеорита. — Докл. АН СССР, 1971, т. 199, № 6, с. 1400—1402.
26. Васильев Н. В., Демин Д. В., Журавлев В. К. и др. Современное состояние исследований Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 4—14.
27. Васильев Н. В., Дмитриенко В. К., Федорова О. П. О биологических последствиях Тунгусского взрыва. — В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 188—195.
28. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Демин Д. В. и др. О некоторых аномальных эффектах, связанных с падением Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 71—87.

29. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Львов Ю. А. и др. Изучение проблемы Тунгусского метеорита Комплексной самостоятельной экспедицией.— В кн.: Итоги исследований по математике и механике за 50 лет. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 137—149.
30. Васильев Н. В., Иванова Г. М., Львов Ю. А. Новое о веществе Тунгусского метеорита.— Природа, 1973, № 7, с. 99—101.
31. Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф. О путях дальнейшего изучения проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 3—15.
32. Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф., Разин С. А., Эпиктетова Л. Е. Показания очевидцев Тунгусского метеорита.— Деп. 24.XI.81, № В350-81д.
33. Васильев Н. В., Кухарская Л. К., Бояркина А. П. и др. О механизме стимуляции роста растений в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 195—202.
34. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И. и др. Поиски вещества Тунгусского метеорита в 1968—1970 гг.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 11—12.
35. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И. и др. Поиски мелкодисперсного космического вещества в торфах района падения Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1973, вып. 32, с. 141—146.
36. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Гришин Ю. А. и др. Поиски вещества Тунгусского метеорита в торфах района междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок.— В кн.: Проблемы космохимии. Киев: Наук. думка, 1974, с. 60—69.
37. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Иванова Г. М. и др. Новые данные о предполагаемом космическом веществе в районе Тунгусской катастрофы.— В кн.: Проблемы космической физики. Киев: Вища школа, 1974, с. 76—83.
38. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Ошаров А. Б. и др. Гипотеза профессора П. Л. Драверта в свете результатов экспедиции 1960 г.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 173—176.
39. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Новые материалы о «светлых почках» лета 1908 г.— В кн.: Физика мезосферных (серебристых) облаков. Рига: Зинатне, 1970, с. 95—101.
40. Васильев Н. В., Фаст Н. П. О связи мезосферных облаков с некоторыми космофизическими явлениями.— В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 64—72.
41. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Границы зон оптических аномалий лета 1908 года.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 112—113.
42. Виноградов А. П., Девирц А. Л., Добкина Э. И. Концентрация  $^{14}\text{C}$  в атмосфере во время Тунгусской катастрофы и антивещество.— Докл. АН СССР. 1966, т. 168, № 4, с. 900—903.
43. Голенецкий С. П., Жигаловская Т. Н., Голенецкая С. П. К вопросу о роли атмосферных выпадений в формировании микроэлементного состава почв и растений.— Почвоведение, 1981, № 2, с. 41—48.
44. Голенецкий С. П., Степанов В. В. К поискам вещества Тунгусского космического тела.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 102—115.
45. Голенецкий С. П., Степанов В. В. Кометное вещество на Земле.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 99—122.
46. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Колесников Е. М. Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 г.— Геохимия, 1977, № 11, с. 1635—1645.
47. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Колесников Е. М., Мурашов Д. А. К вопросу о химическом составе и природе Тунгусского космического тела.— Астроном. вестник, 1977, т. XI, № 3, с. 126—136.
48. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Колесников Е. М., Мурашов Д. А. Экспериментальное обоснование кометной природы Тунгусского косми-

- ческого тела.— В кн.: Проблемы космической физики. Вып. 13. Киев: Изд-во Киевск. ун-та, 1978, с. 39—48.
49. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Мурашов Д. А. К оценке докатастрофного состава Тунгусского космического тела.— *Астроном. вестник*, 1981, т. XV, № 3, с. 167—173.
  50. Гораздовский Т. Я. Динамика взрыва Тунгусского метеорита в свете эффектов лабораторного реологического взрыва.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 74—82.
  51. Григорин С. С. К вопросу о природе Тунгусского метеорита.— Докл. АН СССР, 1976, т. 231, № 1, с. 57—60.
  52. Девириц А. Л. Радиоуглерод в атмосфере Земли в период Тунгусской катастрофы и в прошлом.— В кн.: Труды Всесоюзного совещания по проблеме «Астрофизические явления и радиоуглерод». Тбилиси, 1969. Тбилиси: Изд-во Тбилисс. ун-та, 1970, с. 21—25.
  53. Демин Д. В., Дмитриев А. Н., Журавлев В. К. Информационный аспект исследований Тунгусского феномена 1908 г.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 30—49.
  54. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А. и др. Химический состав силикатных шариков из торфов района падения Тунгусского метеорита.— Докл. АН СССР, 1971, т. 200, № 1, с. 201—204.
  55. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А. и др. Состав микросферул из торфов района падения Тунгусского метеорита.— *Метеоритика*, 1973, вып. 32, с. 147—149.
  56. Драверт П. Л. Бурелом и ожог леса бассейна р. Кети.— *Метеоритика*, 1948, вып. 4, с. 112—114.
  57. Драгавцев В. А., Лаврова Л. А., Плеханова Л. Г. Экологогенетический анализ линейного прироста сосны обыкновенной в районе Тунгусской катастрофы 1908 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 132—141.
  58. Журавлев В. К., Демин Д. В., Вронский Б. И. и др. Результаты шлихового опробования и спектрального анализа почв из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 99—111.
  59. Журавлев В. К., Кошелев В. А., Васильев Н. В. Поиски Восточного вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 163—167.
  60. Зигель Ф. Ю. Об атмосферной траектории Тунгусского тела.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 16—18.
  61. Зигель Ф. Ю. К вопросу о природе Тунгусского тела.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 151—161.
  62. Золотов А. В. О радиоактивности образцов тунгусских деревьев.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 168—172.
  63. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.— Минск: Наука и техника, 1969.— 202 с.
  64. Зоткин И. Т. Об аномальных оптических явлениях в атмосфере, связанных с падением Тунгусского метеорита.— *Метеоритика*, 1961, вып. 20, с. 40—53.
  65. Зоткин И. Т. Тунгусские метеориты падают каждый год.— *Природа*, 1971, № 1, с. 83—84.
  66. Зоткин И. Т., Циклини М. А. Моделирование Тунгусского взрыва.— *Природа*, 1966, № 6, с. 81—89.
  67. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита.— *Метеоритика*, 1961, вып. 21, с. 46—48.
  68. Иванов К. Г. О причинах последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита.— *Геомагнетизм и аэрономия*, 1961, т. 1, № 4, с. 616—618.
  69. Иванов Г. А., Костененко В. И. Возможные последствия воздействия солнечной радиации в момент падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Ме-

- теоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 80—82.
70. Иванова Г. М., Львов Ю. А., Ковалевский А. Ф. Новые опросные данные о падении Тунгусского метеорита, полученные в 1964 году.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 36—39.
  71. Ильина Л. П., Сливина Л. М., Демин Д. В. и др. Результаты спектрального анализа проб почвы из района Тунгусского падения.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 25—27.
  72. Квасница В. Н., Соботович Э. В., Ковалюх Н. Н. и др. Высокобарические полиморфы углерода в торфах района Тунгусской катастрофы.— Докл. АН УССР, серия Б, 1979, № 12, с. 1000—1004.
  73. Кириченко Л. В. К вопросу образования локального следа выпадений от взрыва космического тела в 1908 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 111—126.
  74. Кириченко Л. В., Гречушкина М. П. О радиоактивности почвы и растений в районе падения Тунгусского метеорита.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 139—152.
  75. Ковалевский А. Ф., Потапов И. Н. Об угле наклона траектории Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 161—165.
  76. Коженкова З. П., Брок В. А., Федюшина Л. П. и др. Синоптико-метеорологические условия лета 1908 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 179—186.
  77. Колесников Е. М. О некоторых вероятных особенностях химического состава Тунгусского космического тела.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 87—102.
  78. Колесников Е. М. Изотопные аномалии в торфе с места падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 49—63.
  79. Колесников Е. М., Лаврухина А. К., Фисенко А. В. Новый метод проверки гипотез аннигиляционного и термоядерного характера Тунгусского взрыва 1908 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 102—110.
  80. Колесников Е. М., Люль А. Ю., Иванова Г. М. Нейтроноактивационный анализ некоторых элементов в силикатных шариках из торфа района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 87—99.
  81. Колесников Е. М., Шестаков Г. И. Изотопный состав свинца из торфов района Тунгусского взрыва 1908 г.— Геохимия, 1979, № 8, с. 1202—1211.
  82. Коробейников В. П., Путятин Б. В., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Об эффектах излучения в условиях неоднородной атмосферы при Тунгусском явлении.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 5—24.
  83. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 54—65.
  84. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 115—138.
  85. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Взаимодействие больших метеоритных тел с атмосферой Земли.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 99—117.
  86. Коротков П. Ф. Об увеличении давлений в ударной волне взрыва в направлении ветра.— Журн. прикл. математики и техн. физики, 1981, № 3, с. 25—35.
  87. Крюков Е. Л. Тунгусский метеорит.— М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1949.— 196 с.
  88. Кудрявцева Н. А был ли метеорит?— Техника — молодежи, 1981, № 11, с. 35—37.

89. Кулик Л. А. Метеоритная экспедиция на Подкаменная Тунгуску в 1939 г.— Докл. АН СССР, Новая серия, 1940, т. XXVIII, № 7, с. 597—601.
90. Курбатский Н. П. О лесном пожаре в районе Тунгусского падения в 1908 г.— Метеоритика, 1964, вып. 25, с. 168—172.
91. Левченко М. А., Терентьева А. А. Предварительные результаты спектрального определения примесей в пробах торфа района взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 16—19.
92. Львов Ю. А. О нахождении космического вещества в торфе.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 140—144.
93. Львов Ю. А. Углерод в составе Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 83—88.
94. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Ваулин П. П. и др. Зола в слое торфа 1908 года.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 94—98.
95. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Ошаров А. Б. и др. Проверка одной гипотезы.— Природа, 1961, № 7, с. 98—99.
96. Львов Ю. А., Иванова Г. М. Провальные (термокарстовые) депрессии на крупнобугристых торфяниках района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 48—58.
97. Львов Ю. А., Лагутская Л. И., Иванова Г. М. и др. Болота района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 34—47.
98. Любарский К. А. К вопросу о Тунгусском метеорите 30 июня 1908 г.— Изв. АН ТуркмССР, 1959, № 6, с. 128—129.
99. Методы обнаружения космического вещества в некоторых природных объектах/Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В. и др.— Новосибирск: изд. ИГиГ СО АН СССР, 1971.— 8 с.
100. Некрытов Н. И., Журавлев В. К. Визуальное определение границ вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 87—93.
101. Несветайло В. Д., Ковалюх Н. Н. Динамика концентрации радиоуглерода в годичных кольцах деревьев из центра Тунгусской катастрофы.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 141—151.
102. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита/Васильев Н. В., Журавлев В. К., Журавлева Р. К. и др.— М.: Наука, 1965.— 112 с.
103. Пасечник И. П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 24—54.
104. Пасечник И. П. Уточнение времени взрыва Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. по сейсмическим данным.— В кн.: Космическое вещество и Земля. Новосибирск: Наука, 1986.
105. Петров Г. И., Стулов В. П. Движение больших тел в атмосферах планет.— Космические исследования, 1975, т. 13, № 4, с. 587—594.
106. Петров Г. И., Стулов В. П. Новая гипотеза о Тунгусском метеорите.— Земля и Вселенная, 1975, № 4, с. 74—75.
107. Плеханов Г. Ф. Предварительные итоги двухлетних работ Комплексной самостоятельной экспедиции по изучению проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 3—21.
108. Плеханов Г. Ф. Некоторые итоги работы Комплексной самостоятельной экспедиции по изучению проблемы Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 170—176.
109. Плеханов Г. Ф., Васильев Н. В., Демина Д. В. и др. Некоторые итоги изучения проблемы Тунгусского метеорита.— Геол. и геофиз., 1963, № 1, с. 111—123.



110. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле.— Геол. и геофиз., 1964, № 6, с. 94—96.
111. По следам Тунгусского катастрофы/Васильев Н., Демин Д., Ероховец А. и др.— Томск: Томское кн. изд-во, 1960.— 160 с.
112. Сапронов Н. Л., Соболенко В. М. Некоторые черты геологического строения Куликовского палеовулкана нижнетриасового возраста.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 13—19.
113. Соботович Э. В. Космическое вещество в земной коре.— М.: Атомиздат, 1976.— 160 с.
114. Соботович Э. В., Квасница В. Н., Ковалюх Н. Н. и др. Радиоуглеродные и минералогические свидетельства вещества Тунгусского тела.— Минералогический журнал, 1980, т. 2, № 1, с. 28—32.
115. Соботович Э. В., Квасница В. Н., Ковалюх Н. Н. Новое свидетельство вещественности Тунгусского тела.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 138—141.
116. Соботович Э. В., Ковалюх Н. Н., Васильев Н. В. и др. Оценка степени космогенности силикатной составляющей почв из района падения Тунгусского метеорита по радиоуглеродным данным.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 80—87.
117. Соботович Э. В., Кононенко Л. А. К вопросу об изотопных смещениях в стабильных элементах метеоритов.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 69—80.
118. Соляник В. Ф. Тунгусская катастрофа 1908 г. в свете электрической теории метеорных явлений.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 178—188.
119. Суслов И. М. К разсыску большого метеорита 1908 г.— Мирозведение, 1927, т. 16, № 1, с. 13—18.
120. Сытин В. Пути и встречи.— М.: Советский писатель, 1976.
121. Тресков А. К вопросу о сейсмических волнах, сопровождавших падение Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г.— Астроном. журнал, 1934, т. 11, вып. 6, с. 597—599.
122. Трухачев Г. А. К вопросу о метеоритном кратере в бассейне реки Сым.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 177—178.
123. Фаст В. Г. О траектории Тунгусского метеорита.— В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 27—28.
124. Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А. О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 39—52.
125. Фаст В. Г., Болякина А. П., Бакланов М. В. Разрушения, вызванные ударной волной Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 62—104.
126. Фаст В. Г., Павлова Л. В. Режим ветра в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 83—89.
127. Фесенков В. Г. О природе Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1960, вып. 20, с. 27—31.
128. Фесенков В. Г. О природе комет в условиях падения их на Землю.— Метеоритика, 1961, вып. 21, с. 4—14.
129. Фесенков В. Г. О кометной природе Тунгусского метеорита.— Астроном. журнал, 1961, т. 38, вып. 4, с. 577—592.
130. Фесенков В. Г., Флоренский К. П., Зоткин И. Т., Пьявченко Н. И. Природа Тунгусского падения.— Природа, 1962, № 8, с. 24—42.
131. Фирсов Л. В., Журавлев В. К., Паныхев В. А. Результаты анализов концентрации радиоуглерода в слоях древесины лиственницы из района Тунгусского падения.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 67—77.
132. Флоренский К. П. Предварительные результаты Тунгусской метеоритной экспедиции 1961 г.— Метеоритика, 1963, вып. 23, с. 3—29.

133. Флоренский К. П. Проблемы космической пыли и современное состояние изучения Тунгусского метеорита.— *Геохимия*, 1963, № 3, с. 284—296.
134. Хохряков В. А. О взаимодействии космических тел с атмосферами планет.— *Космические исследования*, 1977, т. 15, № 2, с. 203—207.
135. Цикулин М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел.— *М.: Наука*, 1969.— 87 с.
136. Bartky C. D., Li F., Gordon E., Carta D. Meteor of august 10, 1972.— *Nature*, 1974, v. 247, N 5441, p. 449—450.
137. Ben-Menahem A. Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis of seismic signals at four stations.— *Phys. Earth and Planet. Interiors*, 1975, v. 11, p. 1—35.
138. Bigg E. K., Thompson W. I. Daytime photograph of a group of meteor trails.— *Nature*, 1969, v. 222, N 5189, p. 156—157.
139. Burns J. O., Greenstein G., Verosub K. L. The Tungus event as a small black hole: geophysical consideration.— *Mon. Notic. Roy. Astronom. Soc.*, 1976, v. 175, N 2, p. 355—357.
140. Carr M. H. Atmospheric collection of debris from the Revelstoke and Allende fireballs.— *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1970, v. 34, N 6, p. 689—700.
141. Cowan C., Atluri C. R., Libbi W. F. Possible anti-matter content of the Tunguska meteor of 1908.— *Nature*, 1965, v. 206, N 4987, p. 861—865.
142. Folinsbee R. E., Douglas J. A., Maxwell J. A. Revelstoke, a new type 1-carbonaceous chondrite.— *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1967, v. 31, N 10, p. 1625—1635.
143. Glass B. P. Silicate spherules from Tunguska impact area.— *Science*, 1969, v. 164, N 3879, p. 547—549.
144. Glass B. P. Tunguska silicate spherules and associated metallic phases.— *Meteoritics*, 1976, v. 11, N 4, p. 287—288.
145. Hughes D. W. Tunguska revisited.— *Nature*, 1976, v. 259, N 5545, p. 626—627.
146. Jackson IV A. A., Ryan M. P. Was the Tungus event to a black hole?— *Nature*, 1973, v. 245, N 5420, p. 88—89.
147. La Paz L. The energy of the Podkammenaya Tunguska, Syberia, Meteorite fall.— In: *Popular Astronomie*, 1948, v. 56, p. 330—331.
148. Lerman I. C., Mook W. G., Vogel I. C. Effect of the Tunguska meteor and sunspot on radiocarbon in the treerings.— *Nature*, 1967, v. 216, N 5119, p. 150—175.
149. Opic E. J. A meteorite that got away.— *Irish. Astronom. J.*, 1974, v. 11, N 5—6, p. 165—172.
150. Turco R. P., Toon O. B., Park C. e. a. An analysis of the physical, chemical, optical and historical dates impacts of the 1908 Tunguska meteor fall.— *Icarus*, 1982, v. 50, N 1, p. 1—50.
151. Whipple F. I. W. On phenomena related to the Great Siberian meteor.— *Quart. J. of the Royal Meteorolog. Soc.*, 1934, v. 60, № 256, p. 505—513.

Ю. А. ЛЬВОВ, П. В. ВАСИЛЬЕВ

## О НЕОБХОДИМОСТИ ЗАПОВЕДОВАНИЯ РАЙОНА ТУНГУССКОЙ КАТАСТРОФЫ 1908 г.

30 июня 1908 г. севернее Подкаменной Тунгуски (Красноярский край) на высоте 5—8 км над поверхностью Земли произошел взрыв крупного космического тела, во время которого выделилась энергия с тротиловым эквивалентом 10—40 Мт. Вызванная космическим телом ударная волна повалила лес на площади 2150 км<sup>2</sup> и сопровождалась световыми, звуковыми, сейсмическими, геомагнитными эф-

фектами, отмеченными на большей части территории Сибири. Барические и атмосферно-оптические аномалии достигли при этом глобального развития. Не подлежит сомнению, что в 1908 г. в Сибири произошло редкое природное событие, изучение которого позволяет получить принципиально важные сведения о строении дальнего космоса.

Исследование этой суммы явлений и процессов, условно называемых «падением Тунгусского метеорита», было начато в середине 20-х гг. Л. А. Куликом. В течение последующих 60 лет многочисленные (свыше 60) экспедиции АН СССР, Томского университета и Всесоюзного астрономо-геодезического общества собрали огромный фактический материал, необходимый для решения ряда фундаментальных задач, в том числе определения элементного и изотопного состава космического вещества, изучения эволюции солнечной системы, механизма взаимодействия крупных метеорных тел с атмосферой Земли, материального обмена в системе «Земля — Космос», роли космического вещества в биосферных процессах.

В связи с углублением знаний о космосе и возрастающей технической оснащённостью научных исследований ценность получаемой по Тунгусскому метеориту информации с каждым годом растёт. Вместе с тем в последнее время в результате интенсивного промышленного освоения труднодоступных районов Сибири возрастает угроза нарушения природного состояния района Тунгусского падения, поэтому нужно как можно скорее организовать там биосферный заповедник или заказник.

Эта необходимость вытекает также из ряда других, не менее важных обстоятельств. Следует иметь в виду, что район Тунгусского падения опустошен надземным взрывом, сопоставимым по энергии и эквиваленту с наиболее мощными термоядерными взрывами. Понятно, что изучение как ближайших, так и отдаленных последствий воздействия на биосферу взрывов мегатонной мощности является в современную эпоху проблемой огромной значимости — не только научной, но и социальной.

Далее, уникальность события, многообразие вызванных им эффектов, «стирание» следов катастрофы потребовали разработки ряда оригинальных методов исследования, многие из которых перспективны не только для метеоритики, но и для других отраслей науки и народного хозяйства [2, 5, 8]. Эта методическая работа продолжается. Район падения уже сегодня представляет собой полигон, на котором происходит отработка методологии комплексного исследования крупномасштабного космического явления неизвестной природы.

Можно считать твердо установленным, что ряд последствий Тунгусской катастрофы имеет пролонгированный характер и развивается на протяжении многих десятилетий: например, биологические, в том числе мутационные, процессы, происходящие в районе падения. Совершенно очевидно, что эти явления требуют длительного систематического наблюдения и тщательного исследования природного (земного) фона.

Наконец, еще одна причина, по которой район катастрофы является природоведческим полигоном, эталонным для севера лесной зоны Средней Сибири, заключается в своеобразии его ландшафтного облика и многих природных характеристик. Так, в начальный период исследований за последствия катастрофы нередко принимали чисто земные образования: карстовые и термокарстовые провалы, заболоченные озера, следы древнего вулканизма и т. д. [7]. Позже выяснилось, например, что эпицентр взрыва по случайному стечению обстоятельств совпал с центром древнего вулканического кратера, области повала и ожога леса частично совпали с районами разновозрастных лесных пожаров, а центральная часть области Тунгусской катастрофы характеризуется исключительно мощным развитием термокарста, имитирующего метеоритные кратеры. Все это потребовало детального исследования природного фона района с позиций различных естественно-научных дисциплин. Можно полагать, что ни один район на севере Средней Сибири не был объектом столь пристального внимания, хотя и несколько одностороннего, специалистов в различных областях естествознания, как район падения Тунгусского метеорита.

К настоящему времени он достаточно полно изучен геологами и палеовулканологами, детально описано состояние его лесов [1, 11] и болот [9, 16], выявлены многие биологические особенности его флоры и фауны [11]. Заповедование стимулировало бы дальнейшее использование его в качестве опорного полигона для комплексного изучения специфики природы среднетаежной подзоны Средней Сибири.

Район падения находится в междуречье Чуни и Чамбы (правых притоков Подкаменной Тунгуски) и геологически относится к Тунгусской впадине (синеклизе) Сибирской платформы. В палеозое здесь существовало мелководное море, расчленившееся впоследствии на ряд опреснившихся лагун, заросших древовидными споровыми и голосеменными растениями. Толща минеральных осадков этого времени, переслаиваясь с обугленными остатками растений, дала так называемый «продуктивный отдел» Тунгусской свиты [13].

Бурная вулканическая деятельность, охватившая западную часть Сибирской платформы в конце палеозоя — начале мезозоя, затронула всю территорию района падения. Здесь широко распространены туфогенные породы — смесь вулканического пепла с осколками осадочных пород. Центр района представляет собой огромный кратер (кальдеру) мезозойского возраста с многочисленными побочными кратерами как внутри основного кратера, так и по его наружным склонам. Магма, внедрившаяся в виде пластовых интрузий в осадочную и туфогенную толщи, и вулканические конусы образовали выходы изверженных пород — «сибирских траппов». Устойчивые к физическому выветриванию трапповые тела часто обнажаются на поверхности, сохраняя формы древних вулканических структур; с ними связаны скалистые обрывы и каменные россыпи — «курумники», сползающие со склонов возвышенностей.

Водораздел Подкаменной Тунгуски и Чуни в целом носит ха-

ракетер пологохолмистой, сильно заболоченной равнины. Разнообразие вносят лишь выходы трапвых тел, возвышающиеся на 100—300 м в виде столовых гор или конических сопок. Иногда сопки сливаются в цепи, сопровождающие течение рек (например «ожерелье Макикты», по выражению Л. А. Кулика), или же имеют вид вложенных друг в друга прерывистых колец. Такова Метеоритная котловина в центре района, окруженная кольцом невысоких, но крутосклонных трапвых хребтов. Возвышенности центральной части этой кальдеры (остатки более поздних вулканов) — гора Фаррингтон с относительной высотой около 300 м и вершина Стойкович, у подножия которой расположена Метеоритная заимка, с высотой около 150 м. Кольцо подобных крутосклонных сопек открыто на север в долину р. Кимчу, левого притока р. Чуни, а на юге обрывается в долину р. Хушмо и прорезано висячей долиной руч. Чургим с живописным каскадом.

В целом район падения Тунгусского метеорита представляет собой невысокое плато (средняя абсолютная высота 400—500 м), сложенное маломощными рыхлыми четвертичными отложениями, преимущественно флювиальными наносами, и расчлененное глубоко врезанными долинами рек на отдельные, иногда хребтообразно удлиненные плоские междуречья. Небольшие трапвые возвышенности придают местности характер горной страны. Это впечатление усиливают обнажения горных пород в долинах рек, обилие камня в их руслах, наличие перекатов и даже небольших порогов.

Речная сеть района образована притоками Чамбы и Чуни. Чамба в среднем и верхнем течении имеет сильно заболоченную долину, летом мелководна, вплоть до образования бродов близ устья и на участке небольшого порога в месте пересечения тропой Кулика. Правый приток Чамбы — р. Хушмо, протекающая в 6 км к югу от метеоритной заимки, имеет характер горной речки с крутыми берегами и многочисленными шиверами в русле. По северной части района протекает р. Кимчу, включающая в свое течение небольшое оз. Чеко. Тихая, с болотистыми берегами в верховьях, ниже Чеко она образует перекаты и пороги. Только в устье река замедляет течение. Водораздельное пространство между Чамбой и Кимчу значительно заболочено, и в болотных массивах здесь зарождаются ручьи, принадлежащие к бассейнам разных рек.

Район расположен в пределах зоны отрицательных среднегодовых температур, в области островной вечной мерзлоты. Ему свойственны следующие климатические показатели: среднегодовая температура —6°, годовое количество осадков 388 мм, количество дней с отрицательными температурами — 255, максимальное количество осадков приходится на июнь и июль. Единственный безморозный месяц — июль, его средняя температура +16°, однако дневные температуры нередко превышают +30°. Вегетационный период 110—120 дней. Зимой продолжительны периоды устойчивой и ясной морозной погоды с очень низкими температурами (до —58°). Снеговой покров небольшой, что способствует глубокому промерзанию почвы. Летнее прогревание почвы во многом зависит от местных усло-

вий (плотности лесного полога, наличия мохового покрова или торфяного пласта), в результате чего в плохо прогреваемых грунтах и в почвах накапливается вечная мерзлота.

Вечная мерзлота приурочена к торфяным отложениям. Болотный массив или промерзает целиком, или в нем образуются отдельные торфяные бугры высотой 3—4 м над поверхностью талой части болота. Проморожены как торф, так и залегающие под ним слои грунта. Бурение на Метеоритной заимке (1929 г.) вскрыло нижний уровень мерзлоты на глубине 25 м; ниже располагался водоносный горизонт. В сухих бугристых торфяниках поверхностный слой оттаивает летом лишь на 35—45 см от поверхности, в заболоченных долинах ручьев под моховой дерниной мерзлота спускается до 45—60 см. Минеральные грунты поверхностной вечной мерзлоты, как правило, не содержат. Район падения находится на южной границе островной вечной мерзлоты, поэтому она неустойчива: наряду с ее накоплением происходит протаивание и проседание грунта, приводящее к образованию топких болотных депрессий.

Почвенный покров создают маломощные скелетные, подзолистые на легких по механическому составу грунтах и торфяно-болотные почвы, развитые в депрессиях рельефа, по долинам ручьев и рек. Болотные почвы, как правило, являются мерзлыми, даже если они содержат маломощный торфяной пласт. Мощность подзолистых почв обычно невелика — 30—60 см, а подзолистый процесс очень слабо выражен. Так, в почвенном разрезе под пос. Ванавара глубина профиля составляла всего 65 см при гумусовом горизонте мощностью 3 см, дающем светло-серые потеки и карманы до глубины 41 см; материнская порода — светло-серый песок с мелкими окатанными камушками — прослежена до 175 см [17]. Разрез на трапповой сопке Стойкович показал следующее: бурая глина с черноватым оттенком (мощность 5 см) лежит на обломках траппа, заполняя между ними карманы, далее (до 65 см) крупные камни траппа с бурой глиной между ними, ниже сплошной камень.

Растительный покров района падения образуют типичные для этой части Средней Сибири светлехвойные сосновые и лиственничные леса, при этом первые приурочены к выходам туффов и продуктов их выветривания и к песчаным отложениям, а конкурирующая с сосной лиственница занимает господствующее положение на скелетных почвах, на известняковых осадочных породах и на глинисто-суглинистых отложениях слабо дренированных пространств. Район входит в полосу расселения гибридных форм лиственниц сибирской и Гмелина; кедр и ель обычно составляют небольшую примесь к светлехвойным породам, но на тяжелых почвах отмечаются участки еловых лесов. Пихта встречается редко.

Наиболее распространены лесные сообщества кустарниковой группы, особенно ягодные боры с обилием голубики, брусники, реже толокнянки, водяники. В подлеске, довольно разреженном, встречаются ольховник, можжевельник, изредка шиповники, обычный багульник болотный, таволга средняя. Травяной покров незначительный: рассеянно произрастают кощачья лапка, костяника, водо-

сбор и пр., слабо развит мохово-лишайниковый покров. Таежные леса (из темнохвойных пород) развиты или по речным долинам, или по плоским пространствам между сопками. В их древостое примерно в равных количествах участвуют лиственница и ель, а в подлеске обильны береза, ольха, рябина, ива, бузина, красная смородина. Кустарнички — багульник, голубика — малообильны, хорошо развит моховой покров, в травяном ярусе встречаются как низкорослые таежные тенелюбы — грушанка, линнея, так и представители крупнотравья — борец, живокость, копытник, василистник.

В долинах рек центральная часть речных террас обычно занята лиственнично-кустарничково-сфагновыми болотами со сложным мелкобугристым рельефом. Вдоль русел рек, где мерзлота отступает, образуется полоса низкорослых елей и лиственниц с мозаикой зеленомошных, кустарничковых, мелкотравных и сфагновых фрагментов. Ложбинообразные долины ручьев заняты ерниками — зарослями болотных кустарников, среди которых обычны березки, приземистая и тощая, ивы. Многие ерники имеют постепенные переходы к мелкобугристым молодым болотам. В напочвенном покрове ерников обычны зеленые мхи (томентгипнум, аулакомниум), мелкие осоки и большая группа ксероморфных растений — типчак, курильский чай и пр. Слой органических отложений в ерниках небольшой — 10—50 см, к концу лета он обычно полностью оттаивает.

Широко распространены болота, заполняющие как днища обширных вулканических котловин, так и всевозможные лощины и долины ручьев. Характерны сложные разветвленные болотные системы, в которых сочетаются бугристые мерзлые участки, разделенные топкими понижениями, и талая часть системы, по которой происходит сброс избыточных болотных вод. В окрестностях Метеоритной заимки расположено обширное талое грядово-мочажинное Южное болото, к которому широкими языками примыкают бугристые торфяники склонов котловины, получившие самостоятельные названия (Северный торфяник, Чургимский торфяник, Западный язык и пр.). В растительном покрове гряд и мочажин Южного болота участвуют гипновые и сфагновые мхи, болотные травы и кустарнички (вахта, пушица, клюква, подбел и т. д.), а в растительности бугров доминируют лишайники и сфагновые мхи. По грядам Южного болота растут деревья — сосна, лиственница, береза пушистая; сосна и кедр встречаются и на торфяных буграх. В основании торфяной залежки как талых, так и мерзлых болот лежат низинные осоковые и гипновые торфы, которые в период термического минимума (около 1,5 тыс. лет назад) промерзли, что привело к развитию бугров. Накопление мерзлоты и образование новых очагов мерзлотных болот продолжается и в настоящее время.

Из других типов интразональной растительности следует отметить сообщества скальных обнажений и каменистых осыпей, где выявляется большое разнообразие холодостойких и сухолюбивых растений, многие из которых являются реликтами плейстоценового возраста. В поймах рек узкими полосами вдоль русла формируются травянистые ценозы (осоковые, вейниковые), имеющие вид живо-

писных лугов. Своеобразна также высшая растительность шивер и речных перекастов.

Животный мир района довольно разнообразен. Здесь многочисленны лось, медведь, северный олень, белка, бурундук, встречаются лиса, росомаха, соболь, летяга, колонок, горностаи. Боровая дичь представлена рябчиком, куропаткой, тетеревом, глухарем. На озерах и речных плесах обитают утки, гуси, гагары, на оз. Чеко — лебеди. Реки богаты щукой, налимом, хариусом. Фауна беспозвоночных отличается малочисленностью группы почвенных животных (кольчатых и круглых червей, колембол и пр.) и густым населением лесной и болотной подстилок. В течение всего теплого сезона обилён гнус — комары, мокрецы, в июле наблюдается массовый вылет слепней и оводов. Низкие температуры почвы не препятствуют развитию видов лесных муравьев, гнезда которых — муравейники — на прогреваемых склонах нередко образуют крупные скопления.

Предлагаемые границы заказника близки границам вывала леса, возникшего при взрыве Тунгусского метеорита. В ряде случаев они отступают от границ вывала, удовлетворяя условию быть продолженными по хорошо выраженным местным рубежам — рекам, гребням водоразделов, дорогам. Восточная граница проходит по дороге пос. Ванавара — пос. Стрелка-Чуны. Она начинается в верховьях руч. Нерюнда (приток р. Ванаварка) в 23 км к северу от пос. Ванавара, пересекает р. Чамба у впадения руч. Болодект, затем переваливает водораздел к р. Хушмо и пересекает ее около устья руч. Корё. Далее, следуя вдоль Корё, граница выходит на р. Кимчу у устья руч. Иркин, проходит около 3 км по его течению. Затем сворачивает на запад и по местным водоразделам выходит на верховья руч. Чепракон, а затем на руч. Ядуликан (приток р. Кимчу).

По руч. Ядуликан граница достигает р. Кимчу в ее среднем течении и уходит на юг по руч. Верх. Хаталак (приток Кимчу) до его верховьев. Затем по водоразделу Кимчу — Муторай выходит на верховья руч. Далык, пересекая здесь тропу Ванавара — Муторай, уже по водоразделу Хушмо — Муторай выходит на истоки руч. Чавидокон и затем на истоки р. Верх. Лакура (приток Подкаменной Тунгуски). Проходя вниз по этой реке, граница достигает оз. Пеюнга и, огибая его с севера, выходит на Чамбу в месте пересечения ее тропой Кулика около устья руч. Хаворикта. По этому ручью и по его правому притоку граница выходит на верховья руч. Нерюнда, где замыкается на дороге Ванавара — Стрелка-Чуны. Общая длина границ заказника 230 км, из них 96 км проходит вдоль дорог и троп, 63 км вдоль рек и ручьев и 71 км по водоразделам.

Наибольшая концентрация следов Тунгусского метеорита наблюдается в центральной части района, в окрестностях Метеоритной заимки. Это наиболее часто посещаемая территория, требующая особо бережного отношения. Южная граница ее проходит по р. Хушмо от ее истоков до устья руч. Ямоко и далее до его верховьев, где выходит на р. Кимчу. Проходя по правому борту долины Кимчу и



огнивая оз. Чеко, граница в 2 км ниже озера пересекает Кимчу, проходит по руч. Чеко до его верховьев и там выходит на истоки Хушмо. В пределах центральной части района расположены основные тропы и просеки, постройки Л. А. Кулика.

Территорию заказника пересекают две старые оленьи тропы: тропа Кулика (от пос. Ванавара до Метеоритной заимки и далее на Стрелку-Чуню) и Муторайская тропа, отходящая от первой у р. Макикта и ведущая в пос. Муторай. Кроме того, проложена тропа от пос. Хрустального до урочища Пристань на р. Хушмо; она выходит на тропу Кулика в 5 км от брода через Хушмо. Общий путь от пос. Ванавара до заимки около 80 км. Передвижение по тропам в летнее время возможно только пешком или вьючными оленями. Основная масса экспедиционного груза в настоящее время доставляется вертолетами, для чего на Метеоритной заимке оборудована посадочная площадка. Хушмо в летнее время недоступна даже для мелкосидящих лодок, и поэтому водный путь в центр района (от Ванавары по Подкаменной Тунгуске, Чамбе, Хушмо) не используется.

Метеоритная заимка состоит из двух жилых изб барачного типа, неотапливаемого хозяйственного сруба («кузницы») и лабаза. Эти постройки были срублены в 1928 г. бригадой кежемских плотников и сохранились почти в первоначальном виде. По решению Красноярского крайисполкома они объявлены историческим памятником. К комплексу помещений Метеоритной заимки относятся также охотничьи избы на р. Хушмо (Пристань), на оз. Чеко и новая избушка на р. Кимчу. В летнее время они используются как лабораторные помещения.

В целом район падения Тунгусского метеорита и Метеоритную заимку следует рассматривать как крупный многолетний действующий научный стационар, условия которого позволяют выполнять сложные полевые и даже лабораторные работы. К настоящему времени объем научных публикаций по Тунгусскому метеориту и по району его падения превышает 400 наименований [4, 6]. К наиболее крупным массивам фактического материала относятся каталог вывала леса [14, 15], каталог следов лучистого ожога деревьев, показания очевидцев катастрофы [3], материалы обсерваторий мира за июнь — июль 1908 г., архив сообщений по атмосферно-оптическим явлениям 28 июня — 2 июля 1908 г. из газет России и Западной Европы, сводка сведений по развитию и распространению оптических аномалий в июне 1908 г. [12], фонд данных по содержанию космических сферических частиц в торфах и почвах района падения, материалы по лесотаксационным характеристикам района падения, каталог аномалий (мутаций) сосны, комплекс данных по палеомagnetизму горных пород и ряд других материалов. К сожалению, лишь часть этих сведений опубликована или подготовлена к публикации.

В последние годы район падения Тунгусского метеорита привлекает внимание исследователей как биосферный полигон, в почве и атмосфере которого минимальна доля земных аэрозолей и высока доля космического вещества. Этот район удален от источников про-

мышленного загрязнения атмосферы и воды, очагов активной вулканической деятельности, зон золового переноса земной пыли. Такие организации, как Институт оптики атмосферы СО АН СССР (Томск), Институт прикладной геофизики АН СССР (Москва), Институт геологии и геофизики СО АН СССР (Новосибирск), Институт геохимии и физики минералов АН УССР (Киев), используют эту территорию в качестве контрольного района при работах по оценке промышленных загрязнений воздуха и почвы.

По характеру заповедования Тунгусский метеоритный заказник должен быть комплексным (биосферным). Охране подлежит вся совокупность компонентов природной среды (биогеоценотический покров) со следами их нарушения Тунгусским метеоритом (вывал леса, термические и баллистические повреждения деревьев, почвенный и болотный покровы, содержащие вещество Тунгусского метеорита, магнитные и радиационные воздействия Тунгусского взрыва). Уровень заповедования — республиканский. По своему научному и познавательному значению район падения Тунгусского метеорита находится в ряду важнейших естественно-исторических и культурных заповедных мест нашей страны и относится к природным памятникам мирового значения.

Развитые в районе отрасли народного хозяйства — промысловая охота на пушного зверя и горное производство, специализирующиеся на добыче редких минералов, не находятся в противоречии с режимом заповедования. Зпмний промысел пушного зверя производится ловушками ущемляющего и давящего типа, расположенными вдоль охотничьих троп, не нарушающих структуры растительного покрова. Хозяйственные мероприятия рудника Хрустального проводятся на ограниченных площадях и также не наносят ущерба охраняемым объектам заказника.

На территории заказника должны быть запрещены мероприятия, связанные с нарушением биогеоценотического (почвенного и растительного) покрова на больших площадях, — лесоповал, вскрышные землеройные работы и т. д. Запретными также должны быть виды производственной деятельности, вызывающие промышленное загрязнение воздуха, воды или почвы, даже в небольших размерах. Нежелательно проникновение на территорию заказника мощных транспортных средств (тракторов, вездеходов), использование в границах заказника значительных количеств привозного топлива — нефти и каменного угля. Перечисленные ограничения позволили бы законсервировать следы Тунгусской катастрофы и обеспечить их исследование более совершенными методами, которыми пополняется арсенал науки.

При решении вопроса о необходимости объявления района Тунгусской катастрофы государственным заповедником или заказником следует иметь в виду, что природа Тунгусского метеорита остается во многом загадочной. Из числа предложенных для объяснений Тунгусской катастрофы версий наиболее аргументированной ныне является гипотеза о столкновении Земли с ядром небольшой кометы. Если эта гипотеза будет подтверждена, научный интерес к

району Тунгусского падения резко возрастет, так как в этом случае он окажется единственным на земной поверхности «пятном», содержащим недавнее (менее ста лет) массовое выпадение космического материала, определение состава и свойств которого является одним из ключевых моментов для понимания происхождения и эволюции Солнечной системы. Не меньший научный интерес вызовет этот район в случае подтверждения альтернативной гипотезы об искусственной природе Тунгусского метеорита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бережной В. В., Дранкина Г. И. Изучение аномального прироста леса в районе падения Тунгусского метеорита. — Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 162—169.
2. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г. и др. О загрязнении техногенными отходами почв окрестностей промышленных центров по данным снеговой и торфяной съемки. — Экспресс-информация. Гидрология, Обнинск, 1976, вып. 3(47), с. 22—24.
3. Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф., Разин С. А., Эпиктетова Л. Е. Показания очевидцев Тунгусского метеорита. — Деп. в ВИНТИ 24 ноября 1981, № В350-81 деп.
4. Васильев Н. В., Филимонова В. А. Библиография литературы о Тунгусском метеорите. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 187—209.
5. Голенецкий С. П., Жигаловская Т. Н., Голенецкая С. И. Роль атмосферных выпадений в формировании микроэлементного состава почв и растений. — Почвоведение, 1981, № 2, с. 41—48.
6. Иванова Г. М., Фаст Н. П. Библиография работ Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР (1960—1978). — В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 22—24.
7. Кринов Е. Л. Тунгусский метеорит. — М.: Изд-во АН СССР, 1949. — 196 с.
8. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Иванова Г. М. Метод исследования динамики выпадений промышленной пыли на больших площадях. — Гигиена и санитария, 1974, № 8, с. 97—98.
9. Львов Ю. А., Лагутская Л. И., Иванова Г. М. и др. Болота района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 34—47.
10. Мульдияров Е. Я., Лапина Е. Д. Датировка верхних слоев торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей. — В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 75—84.
11. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. К вопросу восстановления таксационных характеристик «докатастрофного» леса в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 123—126.
12. Почные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита/Васильев Н. В., Журавлев В. К., Журавлева Р. К. и др. — М.: Наука, 1965. — 110 с.
13. Обручев С. В. Поездка на реку Подкаменную Тунгуску. — Красноярск, 1931. — 34 с.
14. Фаст В. Г., Бояркина А. П., Бакланов М. В. Разрушения, вызванные ударной волной Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 62—104.
15. Фаст В. Г., Фаст Н. П., Голенберг Н. А. Каталог повала леса, вызванного Тунгусским метеоритом. — В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 24—74.

16. Шумилова Л. В. О бугристых торфяниках южной части Туруханского края.— Изв. Томск. отд-ния Русского ботанич. о-ва, Томск, 1931, т. 3, вып. 1-2, с. 1—18.
17. Шумилова Л. В. Очерк природы района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 22—33.

В. Д. ГОЛЬДИН

## ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НЕКОТОРЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СОПРОВОЖДАВШИХ ПАДЕНИЕ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

К настоящему времени собрано большое количество фактических данных как о явлениях, сопровождавших падение Тунгусского метеорита, так и о последствиях этого события. С другой стороны, выдвинуто много гипотез для объяснения причин Тунгусской катастрофы; некоторые гипотезы продолжают появляться и по сегодняшний день. Одни из них объясняют лишь отдельные стороны события, другие разработаны только на качественном уровне. Возникает необходимость интерпретации всего комплекса фактических данных. Эта задача ставилась и решалась многими исследователями с первых лет систематического изучения Тунгусского метеорита, но так и не привела к завершенной количественной теории катастрофы, учитывающей все собранные факты. На данном этапе необходимо: 1) установить основные параметры явления (азимут и наклон траектории полета, скорость входа в атмосферу и др.), а также диапазон возможной погрешности их значений; 2) произвести разделение известных фактов на относящиеся и не относящиеся к Тунгусскому метеориту; 3) выделить из множества гипотез, объясняющих причины Тунгусской катастрофы, единственную либо доказать неоднозначность интерпретации имеющегося материала.

Интерпретация фактов, относящихся к Тунгусскому метеориту, тесно связана с проблемой всестороннего анализа явлений, возникающих при входе крупных тел в атмосферы планет. Должны быть объяснены следующие явления:

— сейсмические и барические возмущения, сопровождавшие падение Тунгусского метеорита;

— возмущение земного магнитного поля, зарегистрированное в Иркутске;

— вывал леса в районе падения, его форма и структура поля направлений поваленных деревьев;

— воздушный характер взрыва или взрывоподобного разрушения;

— оптические аномалии лета 1908 г.

Возможно, не все эти явления непосредственно относятся к Тунгусскому метеориту, но тем не менее их анализ необходим хотя

бы для однозначного доказательства их непричастности к катастрофе.

Данная работа посвящена обзору результатов, полученных при интерпретации указанных явлений.

**Сейсмические и барические возмущения.** Взрыв Тунгусского метеорита вызвал воздушную волну, зарегистрированную на многих станциях земного шара, а также сейсмические волны, отмеченные в Иркутске, Тифлисе, Ташкенте и Йене. Анализ этих данных проведен в работах [12, 54, 71—74].

А. В. Вознесенский [12], обрабатывая записи сейсмографов Иркутской станции, определил момент взрыва (вернее, время возбуждения сейсмических колебаний). Однако неточное определение координат падения метеорита по показаниям очевидцев и завышенное значение скорости распространения сейсмических волн привели его к оценке момента взрыва  $t_0 = 0$  ч 17,2 мин по среднему гринвичскому времени, не подтвердившейся впоследствии.

Ф. Уиппл [73, 74] использовал точные координаты падения метеорита, определенные Л. А. Куликом по вывалу леса, данные многочисленных станций, зарегистрировавших воздушную волну, и сейсмограммы Иркутской станции для определения момента взрыва и энергии барического возмущения в эпицентре. Принимая скорость звука и скорость упругих волн постоянными и равными 318 м/с и 3350 м/с, он получил для времени падения оценки:  $t_0 = 0$  ч 16 мин по воздушным волнам,  $t_{0s} = 0$  ч 14 мин по сейсмическим волнам. Используя вычисленные значения энергии барических возмущений на различных станциях и экстраполируя их в эпицентре взрыва, Ф. Уиппл получил для энергии возмущения  $Q = 3,2 \cdot 10^{20}$  эрг.

Авторы работы [72] учли дисперсию воздушных волн при оценке энергии взрыва; на основе полученного ими решения о распространении звуковых возмущений от точечного источника в одно-, двух- и трехслойной атмосфере они оценили тротильный эквивалент взрыва  $Q = 6$  Мт ( $E = 2,6 \cdot 10^{23}$  эрг).

Наиболее полный анализ барограмм и сейсмограмм с учетом дисперсии скоростей распространения воздушных и сейсмических волн и экспериментальных данных, полученных при ядерных взрывах, приведен в работах [54, 71]. Несмотря на некоторые различия в интерпретации сейсмограмм, а также использование различных данных о приборах, применявшихся в 1908 г., авторы [54, 71] пришли к близким оценкам энергии и момента взрыва. Так, в [71] по временам прихода воздушных и сейсмических волн среднее значение момента взрыва  $t_0 = 0$  ч 14,5 мин, в [54] по сейсмическим данным среднее значение для момента возбуждения сейсмических колебаний  $t_{0s} = 0$  ч 14,5  $\pm$  0,8 мин; разница  $t_{0s} - t_0$ , которая должна существовать вследствие установленного воздушного характера взрыва, укладывается в диапазоне разброса  $t_{0s}$ , указанном И. П. Пасечником [54]. В [71] тротильный эквивалент взрыва определен путем экстраполяции энергии барических возмущений в эпицентр взрыва на основе эмпирических формул, полученных при обработке записей барограмм ядерных взрывов:  $Q = 12,5 \pm 2,5$  Мт. И. П. Пасеч-

ник [54] экстраполировал данные работы [73] с учетом затухания воздушных волн и получил  $Q = 20$  Мт. В [54] определена также магнитуда землетрясения, вызванного Тунгусским метеоритом, и по соотношению энергии барических и сейсмических колебаний получена оценка для высоты взрыва; с учетом разброса значений  $Q$  и магнитуды землетрясения автор [54] дает оценку для высоты взрыва  $h = 2,5-9$  км.

Таким образом, можно считать, что задача интерпретации барических и сейсмических возмущений, вызванных падением Тунгусского метеорита, в основном решена. На основе анализа этих данных время взрыва  $t_0 = 0$  ч  $14,5 \pm 1$  мин, тротильный эквивалент  $Q = 10-20$  Мт ( $E = 4 \cdot 10^{23}-10^{24}$  эрг), высота взрыва  $h = 2,5-9$  км. Более точного определения этих величин по данным баро- и сейсмограмм, видимо, произвести не удастся из-за несовершенства использованной в 1908 г. аппаратуры и отсутствия данных по дисперсии скоростей звука и упругих волн на трассе Иркутск — эпицентр взрыва.

Следует отметить, что во всех указанных работах анализ баро- и сейсмограмм проведен на основе зависимостей, полученных для точечных источников возмущений. Представляет интерес также оценка возмущений, вызванных баллистической ударной волной, сопровождавшей полет метеорита в атмосфере.

**Геомагнитное возмущение.** Падение Тунгусского метеорита вызвало отмеченное в Иркутске возмущение магнитного поля Земли, начавшееся в 0 ч 19,5 мин по среднему гринвичскому времени и продолжавшееся в течение 4—5 ч. Магнитограммы этого возмущения были обнаружены только в 1960 г. и опубликованы в [29, 56, 57]. Ни на одной из других существовавших в 1908 г. магнитных станций оно не зарегистрировано. Магнитное возмущение в Иркутске отличалось от обычно наблюдаемых магнитных бурь, вызываемых проникновением в атмосферу солнечного ветра, но имело много общих черт с возмущениями, наблюдавшимися при ядерных взрывах: внезапное начало, общий ход, сравнимую по порядку величины длительность, локальность [29, 36, 37, 56, 57]. Существовали и отличия от магнитограмм ядерных взрывов: большая амплитуда возмущения, более плавный характер кривых, запаздывание магнитного возмущения по сравнению с моментом взрыва (при взрыве на о. Рождества запаздывание также наблюдалось [31]), длительность возмущения в Иркутске в несколько раз превосходила соответствующие длительности для ядерных взрывов. Сходство магнитных эффектов ядерных взрывов с эффектом Тунгусского метеорита побудило многих авторов искать общие причины этих явлений.

Для объяснения причин возмущения, вызванного Тунгусским метеоритом, предлагались следующие механизмы:

- вторжение в атмосферу ионизованного кометного хвоста [34];
- расширение облака плазмы, образовавшегося в результате взрыва метеорита [53];
- повышение уровня ионизации ионосферы действием ионизирующего излучения [23];

— движение электронов в ионосфере, образовавшихся вследствие расширения облака плазмы [53] или повышения уровня ионизации ионосферы [24], вдоль силовых линий магнитного поля Земли;

— усиление ионосферных токов под действием термической ионизации ионосферы ударной волной взрыва [28, 33];

— возникновение токовой системы в ионосфере под действием движений, вызванных дошедшей сюда ударной волной взрыва [28, 29, 31, 33, 36, 37].

По поводу объяснения причин магнитного возмущения в литературе шла продолжительная дискуссия, не приведшая, однако, к единой модели. Тем не менее выяснилось, что некоторые механизмы, видимо, нужно отклонить. Как отмечалось в [28, 31, 33], объяснение магнитного возмущения вторжением ионизованного хвоста кометы противоречит локальности возмущения (оно наблюдалось в Иркутске и не наблюдалось в Свердловске). Поскольку из анализа сейсмо- и барограмм и вывала леса следовало, что взрыв произошел на высоте не более 10 км, то облако плазмы, образовавшееся при взрыве, не могло при расширении достигнуть значительных размеров и, следовательно, вызвать дальнедействующее магнитное возмущение; на это обращалось внимание в [23, 31]. Термическая ионизация ионосферы ударной волной также вряд ли могла быть причиной эффекта, поскольку на пути от места взрыва она ослабла настолько, что не могла вызвать заметной ионизации [23]. Расчет, произведенный в [28, 33], для этого эффекта неудовлетворителен, так как, во-первых, он основан на определении перепада давлений на ударной волне по решению задачи о сильном взрыве [18], что можно делать только на небольших расстояниях от места взрыва, а во-вторых, температура за ударной волной вычислена по формулам для совершенного газа, тогда как с учетом диссоциации она должна быть ниже. По оценкам работы [23], при взрыве на высоте менее 10 км радиус области горячего воздуха с  $T \approx 600-10000$  К (область заметной ионизации) не должен превышать 2 км.

Дрейфовое движение электронов, как это предполагалось в [23, 53], также маловероятно, поскольку дебаевский радиус (расстояние, на котором возможно разделение зарядов) для ионосферы имеет порядок 0,1—10 см, электроны и ионы на большие расстояния могут перемещаться только совместно (амбиполярная диффузия); на самом деле движение заряженных частиц должно быть более сложным, чем это предполагалось в [23, 53].

Основным аргументом в пользу динамозффекта ударной волны взрыва как источника магнитного возмущения в Иркутске является его запаздывание по сравнению с моментом взрыва. На основании величины этого запаздывания в [30] определена энергия взрыва при заданной его высоте, а в [32] высота взрыва по заданной энергии. Однако в [30, 32] использовано решение задачи о сильном взрыве в неоднородной атмосфере [38] для оценки времени прихода ударной волны в ионосферу, что является грубым приближением, занижающим искомую величину времени. На самом деле ударная волна

на высоте  $h = 85$  км уже не является сильной, и нужно использовать более корректное решение, что признает и сам автор [33]. С другой стороны, автор использовал неверное значение момента взрыва, определенное в [12], и получил для времени запаздывания  $\Delta t = 2,3$  мин; если взять более точные оценки [54],  $\Delta t = 5,0 \pm 1$  мин (это значение должно быть уменьшено на величину времени прохождения ударной волны от точки взрыва до поверхности Земли, имеющую порядок 0,5—1,0 мин). Поэтому то, что в [30, 32] получены величины, по порядку совпадающие с другими оценками, следует считать случайностью: видимо, произошла компенсация двух противоположных погрешностей, указанных выше. Представляет интерес проведение уточненного расчета для независимых оценок энергии взрыва либо для его высоты, хотя из-за разброса в значениях времени запаздывания не следует ожидать слишком близкого совпадения в этих оценках с другими.

Следует отметить, что А. В. Золотов [23] подвергает сомнению достоверность запаздывания магнитного эффекта, ссылаясь на отсутствие службы времени и несогласованность часов на сибирских станциях 1908 г. Он считает, что погрешность определения времени запаздывания равна 7,8 мин, что превышает само значение определяемой величины. Однако близкое соответствие между временами прихода сейсмических волн на различные станции и современными сведениями о скоростях распространения этих волн [54] показывает, что по крайней мере на сейсмической станции в Иркутске погрешность начала отсчета времени вряд ли была большой (не более одной минуты). С другой стороны, представляется маловероятным, чтобы две научные станции, находящиеся в одном городе, имели несогласованные часы. Поэтому, хотя погрешность в определении времени запаздывания магнитного эффекта, видимо, существует, вряд ли она столь велика, как считает А. В. Золотов.

В работах [60, 61] сделана попытка количественной оценки магнитного возмущения от токовой системы, возникающей в ионосфере под действием ударной волны; полученные значения согласуются по порядку величины с наблюдаемыми. Следует отметить, что гипотеза, сводящая геомагнитный эффект Тунгусского метеорита к взаимодействию ионосферы с ударной волной взрыва, пока не объяснила значительной длительности возмущения. По проведенным в [60] оценкам, длительность возмущения составляет несколько десятков минут, на самом деле оно наблюдалось в течение нескольких часов. С другой стороны, если ударная волна способна вызвать геомагнитное возмущение, то непонятно, почему наземные ядерные взрывы даже большей мощности не вызывают магнитных бурь; на это обращалось внимание в [19, 23]. Ссылка на более сильное затухание наземного взрыва [31, 36, 37] пока не подтверждена расчетами.

Итак, до настоящего времени нет единого объяснения механизма геомагнитного возмущения, вызванного падением и взрывом Тунгусского метеорита. Возможно, это связано с плохой количественной разработкой предложенных моделей: большая часть работ по геомагнитному эффекту либо посвящена только качественно-



му рассмотрению возможных процессов, либо при оценках использует приближения вне области их применимости. Поэтому представляет интерес более глубокий анализ возможных причин явления.

**Структура вывала леса.** Из последствий падения Тунгусского метеорита наиболее подробно изучен вывал леса в районе падения. В результате работ многочисленных экспедиций установлена граница области разрушений и определена структура поля направлений поваленных деревьев; большая часть каталога экспериментальных данных опубликована в [68]. Основные черты структуры вывала таковы: общий радиальный характер поля средних направлений поваленных деревьев с выраженной особой точкой; наличие стоячего леса в центре области; осесимметричность формы области вывала и поля отклонений средних направлений от радиального; общая площадь поваленного леса  $\sim 2000 \text{ км}^2$ ; характерная двухлепестковая форма области разрушений (ывальная «бабочка»).

В ряде работ [23, 65—67] накопленный экспериментальный материал был подвергнут статистической обработке, которая позволила определить некоторые параметры вывала. Следует отметить, что если положение особой точки векторного поля выявляется достаточно определенно (особые точки, полученные в разных работах, отстоят друг от друга не более чем на 2 км), то положение оси симметрии обнаруживает некоторые особенности. Ось симметрии, определенная по форме области разрушений, по кривизне изоклин (линий одинакового среднего направления поваленных деревьев), имеет магнитный азимут  $111^\circ \pm 2^\circ$  [66]; в [23] по методике, несколько отличной от [66], для азимута оси симметрии получено близкое значение  $114^\circ \pm 1^\circ$ . Однако обработка структуры отклонений векторного поля от радиального, проведенная в [67], показала, что ось симметрии (линия нулевых отклонений от радиальности) имеет азимут  $95^\circ$ . Кроме того, оказалось, что поле стандартных отклонений направлений поваленных деревьев от среднего, обратно пропорциональное, как показано в [66], аэродинамическому напору, вообще не имеет симметрии [66, 67]. Таким образом, проведенный статистический анализ говорит о сложности структуры векторного поля направлений поваленных деревьев.

Тем не менее в общем радиальный характер вывала способствовал привлечению простых моделей для его интерпретации и привел к общепринятому мнению: основной вывал произвела ударная волна от точечного источника, а характерные крылья ывальной «бабочки» и отклонения от радиальности вызваны взаимодействием этой волны с баллистической — волной, образующейся при полете тела со сверхзвуковой скоростью. Наличие области стоячего леса в эпицентре вывала свидетельствует о том, что источник взрывной волны находился над Землей.

Е. В. Маслов [49], исходя из модели центрального взрыва, по границам области стоячего леса и области всего вывала оценил высоту и энергию точечного взрыва  $h \approx 6,5\text{—}11,5 \text{ км}$ ,  $Q \approx 2\text{—}23 \text{ Мт}$  ( $E \approx 0,8 \cdot 10^{23}\text{—}10^{24} \text{ эрг}$ ), что неплохо согласуется с оценками [54, 71]. А. В. Золотов [23] получил  $h \approx 5 \text{ км}$ ,  $Q \approx 3 \cdot 10^{23}\text{—}6 \cdot 10^{23} \text{ эрг}$ .

Предположение о том, что вывал объясняется воздействием взаимодействующих взрывной и баллистической волн, использовалось в ряде работ [9, 23, 26, 39—43] для оценки параметров Тунгусского падения. При этом взрывная волна моделировалась волной от точечного взрыва, а баллистическая — волной от детонирующего шнура. Эта модель позволяет путем сравнения расчетных и полученных по вывалу значений горизонтального скоростного напора на поверхности Земли более точно определить энергию взрыва и его высоту, по характерному размаху «крыльев бабочки» или по отклонениям от радиальности — угол наклона траектории Тунгусского метеорита, а по значению энергии баллистической волны и массе летящего тела (либо по его размерам) — скорость. При этом очевидно, что ось симметрии вывала должна совпадать с проекцией траектории полета Тунгусского тела.

А. В. Золотов [23] предпринял попытку такого моделирования для оценки соотношения энергий баллистической и взрывной волн, а также угла наклона траектории. Однако поскольку А. В. Золотов моделировал только один параметр — максимальное отклонение направления повала от радиального, то он пришел к выводу, что суммарная энергия баллистической волны много меньше энергии центрального взрыва, а скорость тела  $v = 1\text{--}1,5$  км/с. Кроме того, в работе [23] так и не получена общая форма области вывала. При столь малом значении энергии баллистической волны она должна бы быть гораздо ближе к круговой, чем наблюдаемая в действительности.

В работе [26] поле разрушений экспериментально моделировалось взрывом детонирующего шнура с усилением на конце над горизонтальной плоскостью с закрепленными на ней проволочками, имитирующими лесной массив. Было показано, что наиболее близкая к действительности форма области разрушений получается при угле наклона шнура  $\alpha = 30^\circ$  и усилении заряда на конце шнура в 4 раза.

В работах [39—43] с помощью приближенного решения газодинамических уравнений произведена серия расчетов взаимодействия баллистической и центральной ударных волн с поверхностью Земли при различных значениях входных параметров. В них подробно исследовано влияние высоты зарядов, их энергий и угла наклона цилиндрического заряда к горизонту на форму и структуру динамического воздействия волн на земную поверхность. Наибольшее соответствие расчетного и действительного вывала было получено при следующих значениях параметров [42, 43]: высота  $h = 6,5$  км, угол наклона  $\alpha = 40^\circ$ , энергия взрывной волны  $E_0 = 10^{23}$  эрг, энергия баллистической волны  $E_1 = 1,4 \cdot 10^{17}$  эрг/см; при этом суммарная энергия баллистической волны оказалась больше энергии центрального взрыва. Расчет, проведенный в [39], показал, что учет диссоциации, ионизации и излучения мало влияет на перепад давлений на ударной волне и поэтому слабо сказывается на картине разрушений и величинах искомых параметров. Следует отметить, что при малом угле наклона размах «крыльев бабочки»

уменьшается (появляется полосовой вывал) и возникает характерная выемка в кормовой части; уменьшение же при этом энергии баллистической волны приводит к постепенному исчезновению крыльев, форма области разрушений приближается к круговой. Поэтому высказанное в [24] предположение, что наблюдаемая форма и структура вывала может быть получена и при малом угле наклона, опровергается расчетами [39—43].

Попытка учета неоднородности атмосферы, предпринятая в [9] с помощью метода [7], несколько отличающегося от используемого в [39—43], как показала дискуссия [8, 43], оказалась менее корректной и не привела к воспроизведению области разрушений.

Таким образом, эксперименты и расчеты, подтверждающие предположение, что вывал можно описать взаимодействием волн цилиндрического и сферического взрыва, однозначно указывают на большой угол наклона траектории к горизонту. Однако сопоставление такого угла наклона с показаниями очевидцев на р. Ангаре приводит к слишком большой высоте загорания метеорита. Показания очевидцев с р. Нижняя Тунгуска, на основании которых был построен восточный вариант траектории тела, согласовавшийся с линией нулевых отклонений векторного поля вывала от радиального, видимо, не относятся к Тунгусскому метеориту, как показано в работе [11]. Наличие двух осей симметрии вывала (определенных по его форме и по векторной структуре), направления которых отличаются на  $20^\circ$ , не согласуется с простой моделью, используемой в [9, 23, 26, 39—43]. Не согласуются с ней и некоторые аномалии в поле направлений поваленных деревьев, например отклонения от радиальности в передней части «бабочки». Ссылка на неоднородность рельефа вряд ли может это объяснить, поскольку характерный размер аномалий больше размеров неоднородностей рельефа [67]. Поэтому при интерпретации вывала для объяснения указанных несоответствий необходимы более сложные модели. Возможно, Тунгусский метеорит не представлял собой единого тела, а был более сложным и неоднородным образованием (рой камней, сгустки облака пыли или что-нибудь иное). Представляет интерес моделирование ударных волн, возникающих при движении и разрушении таких образований, с учетом последних моделей движения метеорита в атмосфере [17, 55]. Конечно, при этом возникает большой произвол в выборе параметров, однако его степень нужно выяснить.

**Лучистый ожог деревьев.** Среди термических повреждений деревьев района падения Тунгусского метеорита особое внимание привлекли повреждения, обнаруженные на ветках лиственниц, переживших катастрофу. Они датируются 1908 г., ориентированы преимущественно вверх и к единому центру. Первоначально они были интерпретированы как результат ожога лучистым потоком, возникшим при разрушении метеорита [20]. Однако результаты работ, проведенных в последнее время Комиссией по метеоритам и космической пыли СО АН СССР, показали, что некоторые из этих повреждений могли образоваться в результате лесного пожара, возник-

шего при падении метеорита. В ходе экспедиций выявлены область распространения обнаруженного эффекта и количественные характеристики повреждений. Методика сбора и первичной обработки исходного материала описана в [13, 22, 35]; основные результаты опубликованы в [22, 47].

С. А. Разин [59], предполагая, что обнаруженные термические повреждения — это результат лучистого ожога деревьев, путем статистической обработки собранного материала определил положение эффективного источника излучения: его горизонтальная проекция оказалась смещенной почти на 3 км к востоку от особой точки вывала, определенной В. Г. Фастом [66], и высота  $h = 5-6$  км.

В работе [39] моделировалось также воздействие на земную поверхность радиационных потоков от точечного и линейного источников излучения, при этом входные параметры согласовывались с величинами, определенными по вывалу леса [40—43]. Было показано, что с помощью такой модели можно объяснить вытянутость области термических повреждений и смещенность ее центра относительно проекции точечного источника. Следует отметить, что наблюдаемая сложная структура области распространения повреждений плохо согласуется с простой моделью, используемой в [39]. Для интерпретации наблюдаемой картины представляет интерес изучение и моделирование возникновения и распространения лесного пожара, вызванного катастрофой.

В работах [18, 22, 23] разными способами проводились оценки доли лучистой энергии в общей энергии взрыва Тунгусского метеорита; полученные значения колеблются от 0,005 [18] до 0,3 [23]. Поскольку такая высокая доля излучения не характерна для обычных взрывов химической природы, А. В. Золотов [23] считал полученные значения подтверждением ядерной гипотезы взрыва Тунгусского метеорита. Однако проведенные в [39] расчеты разлета области горячего воздуха показывают, что потери энергии на излучение зависят от начальной температуры и могут при достаточно высокой температуре ( $T \sim 10\,000-20\,000$  К) составлять 10—30% от начальной энергии. Поскольку при полете в атмосфере со скоростями выше второй космической в области сжатого воздуха перед телом могут достигаться даже большие температуры, значительная величина потерь на излучение может быть объяснена без привлечения ядерной гипотезы.

**Воздушный характер взрыва.** Когда в результате анализа вывала леса выяснилось, что Тунгусский метеорит не образовал кратера при своем падении, а разрушился в воздухе, возникла проблема механизма его взрыва: каким образом тело, входившее в атмосферу, могло выделить на некоторой высоте в малопротяженной области энергию  $E = 10^{23}-10^{24}$  эрг и не оставить заметных следов выпадения массы? Элементарные вычисления показывают, что при естественном происхождении тела основным источником энергии его взрыва является кинетическая энергия, учет других видов энергии (например, химической) может дать лишь небольшие поправки к кинетической. Действительно, торможение тела, летевшего со ско-

ростью  $v$ , в малом объеме равносильно взрыву в этом объеме с удельной энергией  $v^2/2$ ; даже при  $v = 10$  км/с эта величина, равная  $5 \cdot 10^7$  дж/кг, на порядок превышает, например, удельную энергию взрыва тринитротолуола  $q = 4 \cdot 10^6$  дж/кг.

В. А. Хохряков в [70] объясняет эффекты, связанные с Тунгусским метеоритом, без привлечения какого-либо механизма его разрушения: предполагается, что метеорит, имея азродинамическое качество, пролетел на некоторой высоте над Землей и либо снова ушел в космос, либо выпал в другом месте, а разрушения произвела сопровождавшая его ударная волна. Однако в этом случае траектория тела была бы наклонена под малым углом к горизонту и ударная волна произвела бы полосовой вывал. Кроме того, вывальная «бабочка» должна была бы иметь передние «крылья», чего не наблюдается в действительности. Поэтому или имел место рикошет и испытала его небольшая часть тела, или же скорость движения этой части была меньше скорости тела до взрыва, так что соответствующая ей ударная волна была слабее. В этом случае проблема торможения тела в малом объеме остается.

Анализ движения и испарения метеорита, проведенный В. А. Бронштэном в [6] на основе физической теории метеоров, дал оценки вероятных значений его массы и скорости в конечной точке траектории:  $2 \cdot 10^4$  т  $< M_k < 7,5 \cdot 10^5$  т,  $16$  км/с  $< v_k < 30$  км/с, но вопрос о преобразовании конечной кинетической энергии тела в энергию ударной волны и излучения остался открытым.

В работе [64] высказано предположение о тепловом взрыве метеорита: быстрое торможение и разрушение тела обусловлено его интенсивным испарением под действием излучения сжатого воздуха, находящегося между поверхностью тела и ударной волной. Однако для лучистых потоков к телу оценки, произведенные в [64], некорректны. Строго говоря, радиационные потоки должны определяться из решения задачи обтекания с учетом лучистого переноса. Для тел, движущихся в атмосфере Земли, эта задача решена [3, 4, 50]. Анализ результатов ее решения показывает, что поток излучения можно вычислять по формуле  $q_R = \frac{1}{2} c_H \rho v^3 S$ , где коэффициент радиаци-

онного теплообмена  $c_H$  определяется скоростью тела  $v$ , плотностью атмосферы  $\rho$ , характерным размером тела и его формой (здесь  $S$  — площадь миделева сечения тела); в [64] же лучистый поток определялся в основном температурой воздуха за ударной волной. Как показано в [3], при полете крупных тел с большой скоростью на низких высотах  $c_H$  становится значительно меньше принимаемого часто в физической теории метеоров значения  $c_H = 0,1$  и, следовательно, влияние радиационного нагрева на полет тела при этих условиях уменьшается. Хотя расчет движения метеорита с использованием последних данных по коэффициентам лучистого теплообмена до сих пор не проведен, маловероятно, чтобы учет одного только испарения мог объяснить необходимое выделение энергии вблизи конечной точки траектории.

В работах В. Г. Фесенкова [69], Г. И. Покровского [58] и Д. Ф. Анфиногенова [1] обращалось внимание на необходимость усложнения физической теории метеоров применительно к проблеме Тунгусского метеорита путем рассмотрения процессов дробления и разрушения тел малой прочности. Т. Я. Гораздовский [16] и М. М. Мартынюк [48] рассмотрели некоторые механизмы дробления тела. Однако в [1, 16, 48, 58, 69] были приведены либо качественные рассуждения, либо только первоначальные оценки; количественной теории, которая позволила бы проследить движение метеорита, потерю его массы и энерговыделение вдоль траектории, построено не было.

Г. И. Петров и В. П. Стулов в [55] для объяснения воздушного характера взрыва высказали гипотезу отрыва ударной волны от тела, вызвавшую дискуссию в литературе [10, 17]. Авторы [55] предположили, что Тунгусский метеорит представлял собой тело малой средней плотности  $\rho_m = 0,01$  г/см<sup>3</sup>. В результате нестационарного взаимодействия такого тела с атмосферой оно деформировалось и затормозилось, а ударная волна, дошедшая до поверхности Земли, произвела наблюдающиеся разрушения. При анализе движения метеорита и уноса его массы авторы [55] рассматривали как единое целое движущееся тело и находящиеся у его лобовой поверхности продукты испарения в силу малой скорости растекания паров. Они считали, что унос массы такого образования происходит только через слой смещения пара с воздухом ударного слоя. В работе [10] такая схема подвергается критике на основе известных сведений о движении паров материала тела при стационарном его обтекании [14, 15]. Действительно, как следует из [14, 15], несмотря на малую скорость растекания продуктов испарения под действием градиента давления, расход массы в слое паров оказывается значительно больше расхода через слой смещения; при стационарном обтекании расход через слой вдуваемых продуктов испарения равен расходу в следе за телом, который вряд ли можно рассматривать совместно с самим метеоритом. Однако эти рассуждения годятся лишь для стационарного обтекания, при нестационарном обтекании картина может измениться. Задача обтекания тела с учетом его испарения содержит несколько характерных времен [55]:

$$t_1 = \frac{D}{v} \frac{\rho_m}{\rho_{cH}}, \quad t_2 = \frac{D}{v}, \quad t_3 = \frac{DQ}{v^3} \frac{\rho_m}{\rho_{cH}},$$

$$t_4 = \frac{h_0}{v}, \quad t_5 = \frac{D}{a}, \quad t_6 = \frac{D}{U},$$

где  $t_1$  — характерное время торможения тела в атмосфере,  $t_2$  — характерное время обтекания,  $t_3$  — время испарения,  $t_4$  — время возрастания давления в ударном слое на свою величину,  $t_5$  — время прохождения звуковой волны по слою паров,  $t_6$  — время движения пара от лобовой поверхности до следа,  $D$  — характерный размер тела,  $\rho_m$  — его плотность,  $v$  — его скорость,  $Q$  — теп-

лота испарения материала тела,  $\rho$  — плотность атмосферы,  $c_H$  — коэффициент лучистого теплообмена,  $h_0$  — характерный линейный размер атмосферы,  $a$  — скорость звука в слое вдуваемых газов,  $U$  — скорость продольного растекания паров. Нестационарность обтекания будет проявляться при выполнении хотя бы одного из неравенств:

$$\frac{t_1}{t_5} \leq 1, \quad \frac{t_2}{t_5} \leq 1, \quad \frac{t_3}{t_5} \leq 1, \quad \frac{t_6}{t_5} \leq 1.$$

Масса, уходящая в единицу времени вслед за телом, становится равной по порядку величины расходу в слое вдува через время  $t_6$ , поэтому совместное рассмотрение движения тела и пара возможно лишь при  $t_3/t_6 \ll 1$ . Поскольку  $U \sim v \sqrt{\rho/\rho_w}$  ( $\rho_w$  — плотность пара) [10, 14, 15], то

$$\frac{t_3}{t_6} = \frac{DQ}{v^3 \rho c_H} \frac{v}{D} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_w}} = \frac{Q}{v^2 c_H} \frac{\rho_m}{\rho} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_w}}.$$

Если принять  $v = 30$  км/с,  $\rho/\rho_w \approx 10^{-2}$ ,  $Q = 3 \cdot 10^6$  дж/кг (для льда), а  $c_H = 0,1$ , то  $t_3/t_6 \approx 0,3 \cdot 10^{-2} \rho_m/\rho \sim 10^{-3} \rho_m/\rho$ . Отсюда следует, что для тел с  $\rho_m \sim 1$  г/см<sup>3</sup> совместное рассмотрение движения продуктов разрушения и самого тела некорректно; по крайней мере, при таком рассмотрении необходимо учитывать расход пара через след. Если же  $t_3/t_6 \ll 1$ , то схема, рассмотренная в [55], правомерна и критика [10] с этой точки зрения несостоятельна.

Авторы [55] делают вывод, что Тунгусский метеорит еще до входа в атмосферу представлял собой рыхлое образование малой плотности  $\rho_m \sim 0,01$  г/см<sup>3</sup>. Против этого предположения выдвинут ряд аргументов, с которыми можно согласиться. С одной стороны, непонятно, как такое образование могло существовать в космосе заметное время — в [10] время существования тела размером 150 м и плотностью  $\rho_m \sim 0,01$  г/см<sup>3</sup> определяется в один год. С другой стороны, для того чтобы ударная волна смогла произвести наблюдаемые разрушения и область лучистого ожога совпала с областью вывала, необходимо, чтобы ее отрыв от тела произошел на высоте, примерно равной той, которая получается из анализа барограмм, сейсмограмм и вывала. В таком случае непонятно, как тело столь малой плотности и, следовательно, малой прочности могло проникнуть так глубоко в атмосферу [10, 17]. Анализ, проведенный в [17], показывает, что рыхлое тело с  $\rho_m = 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> размером  $D = 280$  м должно рассеяться на высоте  $h = 23$  км, что гораздо больше необходимого значения для объяснения вывала. А. С. Руцаев [44—46] провел численный анализ входа в атмосферу газового облака малой плотности, исследовал его поведение под действием нарастающих при движении аэродинамических нагрузок в зависимости от определяющих параметров задачи. Следует отметить существенное влияние начальной высоты движения такого облака. В [45] облако, имевшее на высоте  $h = 120$  км плотность  $\rho = 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>, размер  $D = 2$  км и скорость  $v = 40$  км/с, полностью затормозилось на вы-

соте  $h = 30$  км. Для того чтобы торможение произошло на высоте  $h = 6$  км в соответствии с параметрами Тунгусского падения, автор [46] вынужден был заложить следующие начальные данные: размеры облака  $312 \times 312 \times 470$  м<sup>3</sup>, начальная плотность  $\rho_m = 4 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>, скорость  $v = 40$  км/с, начальная высота  $h = 20$  км; при этом весь процесс торможения длился около 1 с и произошел на пути длиной 16 км. Вопрос о том, как могло образоваться такое облако столь низко в атмосфере, остается открытым. Таким образом, в модели, предложенной в [55], обнаруживаются противоречия, которые, может быть, преодолимы путем подбора параметров. В работе [55] проблема движения в атмосфере тел малой плотности в режиме нестационарного обтекания лишь поставлена, но не решена.

С. С. Григорян [17] впервые на количественном уровне разработал теорию входа метеорита в атмосферу с учетом его дробления. Согласно [17], движение метеорита в атмосфере можно разбить на три стадии.

1. Тело движется как единое целое, его движение описывается физической теорией метеоров; под воздействием внешних нагрузок внутри тела возникает поле механических напряжений.

2. После того как напряжения достигают предельной величины, начинается дробление с частичным растеканием раздробленной массы.

3. Масса полностью раздробленного тела растекается аналогично капле несжимаемой жидкости; при этом происходит ее торможение до звуковой скорости.

В зависимости от определяющих параметров задачи эти стадии могут занимать различное время, причем некоторые из них могут не реализовываться. В [17] показано, что подбором параметров можно объяснить полное торможение и распыление тела в соответствии с параметрами Тунгусского падения. Так, тело, состоящее из льда, плотностью  $\rho_m = 1$  г/см<sup>3</sup>, диаметром  $D = 10$  м и прочностью  $\sigma_* = 50$  кГ/см<sup>2</sup> при входе со скоростью  $v = 30$  км/с под углом  $30^\circ$  к горизонту начнет дробиться на высоте  $z_* = 38$  км и затормозится до скорости звука на высоте  $z_0 = 23,5$  км; если же диаметр тела  $D = 100$  м, то торможение до скорости звука произойдет на высоте  $z_0 = 2,8$  км [17]. При этом на заключительном участке траектории наблюдается усиление плотности выделения энергии. Таким образом, теория С. С. Григоряна [17], видимо, может объяснить торможение и разрушение Тунгусского метеорита на некоторой высоте без привлечения гипотезы о его малой плотности. Для создания окончательной количественной картины входа метеорита и определения его параметров необходимо дополнить теорию [17] рассмотрением процессов испарения под действием аэродинамического нагрева и, кроме того, определить динамическое воздействие ударных волн на поверхность Земли, либо задавая определенное в [17] энерговыделение вдоль траектории в модели [39—43], либо рассматривая более сложные модели. Гипотеза дробления метеорита не исключает также выпадения в районе вывала или его окрестности небольших фрагментов исходного тела.



В. Ф. Соляник в работах [62, 63] предположил, что Тунгусский метеорит представлял собой железное тело, которое при движении в атмосфере приобрело заряд  $\sim 100$  Кл и раздробилось под действием ponderomotorных сил, наблюдаемые же разрушения вызваны электрическим разрядом между метеоритом и поверхностью Земли. Хотя анализ влияния электрических явлений на процессы, возникающие при движении тела в атмосфере с гиперзвуковой скоростью, до конца не проведен, вряд ли это влияние так велико, как считает автор [62, 63]. Некоторые положения, высказанные в работе [63], неверны, некоторые малообоснованны и вызывают возражения. При движении тела происходит не только выбивание электронов с его поверхности, но идут и обратные процессы: прилипание электронов набегающего потока к телу, рекомбинация выбитых электронов. При появлении у метеорита положительного заряда возникающее электрическое поле препятствует дальнейшему его зарядке. Таким образом, не все механизмы действуют в одну сторону, как считает автор [63], поэтому для оценки заряда тела необходимо определить скорости предполагаемых процессов. Свободные электроны в следе появляются не в результате эмиссии с поверхности тела, а главным образом в результате термической ионизации воздуха, прошедшего через ударную волну, и продуктов испарения метеорита; поэтому суммарный заряд электронов следа уравнивается не положительным зарядом тела, а зарядом ионов, движущихся вместе с электронами. Следовательно, утверждение о существовании электрического диполя метеорит — след неверно. При движении в плотных слоях атмосферы вокруг тела образуется слой плазмы. Как известно, разделение зарядов в плазме при отсутствии внешнего значительного электрического поля возможно лишь на расстоянии порядка дебаевского радиуса [51]:  $\lambda_D = (\epsilon_0 k T / (n_e e^2))^{1/2}$ , где  $T$  — температура,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $k$  — постоянная Больцмана,  $e$  — заряд электрона,  $n_e$  — число электронов в единице объема;  $\lambda_D$  для характерных условий движения тела много меньше его размера, поэтому электроны, испускаемые телом, могут находиться лишь в его ближайшей окрестности. Область, охватывающая тело и некоторую его окрестность, в целом остается нейтральной, поэтому условий для возникновения разряда между метеоритом и Землей не возникает. С другой стороны, даже если такой разряд и возник бы, то в силу высоких температур в его канале вряд ли в эпицентре катастрофы остались бы пережившие ее деревья [21]. Таким образом, высказанная в [62, 63] гипотеза об электрической природе взрыва Тунгусского метеорита представляется необоснованной.

**Оптические аномалии лета 1908 г.** Падение Тунгусского метеорита сопровождалось целым комплексом аномальных оптических явлений, которые начались несколько ранее 25 июня, достигли максимума в день падения и закончились значительно позднее. Эти аномалии включали в себя необычайно широкое распространение серебристых облаков, яркие зори, нарушения атмосферной поляризации и свечение сумеречного и ночного неба. Подробное описание

оптических явлений 1908 г. содержится в [25, 52]. Хотя в некоторых работах (например, [69]) и высказывались предположения, что эти явления можно объяснить вторжением в атмосферу облака космической пыли или хвоста кометы, полной теории взаимодействия такого облака с атмосферой, объясняющей механизмы аномалий, границы их распространения и развитие во времени, до сих пор не создано.

\* \*  
\*

Таким образом, интерпретация явлений, связанных с падением Тунгусского метеорита, далеко не завершена. Исчерпывающим образом интерпретированы лишь записи баро- и сейсмограмм. Теория геомагнитного эффекта требует более глубокой разработки, в определении причин лучистого ожога сделаны только первые шаги, отсутствует модель механизма оптических аномалий. При интерпретации вывала леса подробно изучена модель [39—43], предполагающая источником разрушений совокупность ударных волн от сферического и цилиндрического взрывов. Она хотя и воспроизвела форму и основные черты области разрушений, но не смогла объяснить векторную структуру поля направлений поваленных деревьев и плохо согласована с показаниями очевидцев. Новые модели движения метеорита в атмосфере [17, 55] могут объяснить его торможение и рассеяние в воздухе, но еще не доведены до согласования параметров движения с наблюдаемыми разрушениями. Не нашли объяснения также некоторые биологические аномалии района падения; высказанное в [27] предположение о влиянии солнечного излучения, проникшего через «окно» в озоновом слое, пробитом метеоритом, требует количественной разработки. Из параметров Тунгусского метеорита наиболее точно установлены следующие: момент взрыва  $t_0 = 0$  ч  $14,5 \pm 1$  мин по среднему гринвичскому времени, энергия взрыва  $E = 4 \cdot 10^{23} - 10^{24}$  эрг (тротильный эквивалент  $Q = 10 - 20$  Мт), высота  $h = 2,5 - 9$  км. Направление траектории метеорита, параметры его движения и характеристики самого тела остаются неопределенными. Незавершенность интерпретации основных явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита, не позволяет сделать окончательный вывод о его природе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анфиногенов Д. Ф. О Тунгусском метеоритном дожде. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск: изд. ИГиГ СО АН СССР, 1966, с. 20—22.
2. Астапович И. С. Новые материалы по полету большого метеорита 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири. — Астроном. журн., 1933, т. 10, вып. 4, с. 465—486.
3. Биберман Л. М., Бронин С. Я., Брыкин М. В. Теплообмен при гиперзвуковом обтекании в условиях сильного радиационно-конвективного взаимодействия. — Теплофиз. высоких температур, 1979, т. 17, № 1, с. 84—91.
4. Биберман Л. М., Бронин С. Я., Лагарьков А. Н. Радиационно-конвективный

- теплообмен при гиперзвуковом обтекании затупленного тела.— Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1972, № 5, с. 112.
5. Бояркина А. П., Демин Д. В., Зоткин И. Т., Фаст В. Г. Изучение ударной волны Тунгусского метеорита по вызванным ею разрушениям леса.— Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 112—128.
  6. Бронштэн В. А. К вопросу о движении в атмосфере Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1961, вып. 20, с. 72—86.
  7. Бронштэн В. А. Распространение сферических и цилиндрических взрывных волн в неоднородной атмосфере с учетом противодавления.— Журн. прикл. механики и техн. физики, 1972, № 3, с. 84—90.
  8. Бронштэн В. А. О методах расчета взрывной и баллистической волн Тунгусского метеорита.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 156—162.
  9. Бронштэн В. А., Бояркина А. П. Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 47—63.
  10. Бронштэн В. А., Станюкович К. П. О движении больших тел в атмосферах планет.— Космические исследования, 1979, т. XVII, вып. 6, с. 858—866.
  11. Васильев Н. В. История изучения проблемы Тунгусского метеорита в послевоенные годы (1970.—1980 гг.).— В кн.: Космическое вещество и Земля. Новосибирск: Наука, 1986.
  12. Вознесенский А. В. Падение метеорита 30.VI.1908 г. в верховьях р. Хатайги.— Мирведение, 1925, т. 14, № 1, с. 25—38.
  13. Воробьев В. А., Ильин А. Г., Шкута Б. Л. Изучение термических поражений веток лиственниц, переживших Тунгусскую катастрофу.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 110—117.
  14. Гершбейн Э. А. Теория гиперзвукового вязкого ударного слоя при больших числах Рейнольдса и при сильном вдуве инородных газов.— Прикл. математика и механика, 1974, т. 38, № 6, с. 1015—1024.
  15. Гершбейн Э. А., Пилюгин Н. Н., Тирский Г. А. Гиперзвуковое обтекание затупленных тел произвольной формы вязким пзлучающим газом при наличии сильного вдува инородных газов.— Тезисы докладов на XXIV Международном астрономическом конгрессе. Баку, 1973. М.: пзд. ВИНТИ, 1973, с. 146—149.
  16. Гораздовский Т. Я. Динамика взрыва Тунгусского метеорита в свете эффектов лабораторного реологического взрыва.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 74—82.
  17. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет.— Космические исследования, 1979, т. XVII, вып. 6, с. 875—893.
  18. Журавлев В. К. К оценке световой энергии Тунгусского взрыва.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 120—122.
  19. Журавлев В. К., Демин Д. В., Демина Л. Н. О механизме магнитного эффекта Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 154—161.
  20. Журавлев И. И. О возможной причине повреждения ветвей лиственницы в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 118—119.
  21. Зенкин Г. М., Ильин А. Г., Егоршин А. И. и др. Характеристика деревьев, переживших Тунгусскую катастрофу в ее эпицентре.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 84—86.
  22. Зенкин Г. М., Ильин А. Г. О лучевом ожоге деревьев в районе взрыва Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 129—140.
  23. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.— Минск: Наука и техника, 1969.— 202 с.
  24. Золотов А. В. К вопросу о моделировании взрыва Тунгусского космического тела 1908 года.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 18—21.
  25. Зоткин И. Т. Об аномальных оптических явлениях в атмосфере, связанных с падением Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1961, вып. 20, с. 40—53.

26. Зоткин И. Т., Цикулин М. А. Моделирование взрыва Тунгусского метеорита.— Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 1, с. 59—62.
27. Иванов Г. А. Прорыв солнечного ветра?— Соц. индустрия, 1980, 20 нояб.
28. Иванов К. Г. Об энергии взрыва Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1961, вып. 21, с. 44—45.
29. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1961, вып. 21, с. 46—48.
30. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита.— Геомагнетизм и аэронавигация, 1961, т. I, № 4, с. 616—618.
31. Иванов К. Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере.— Геомагнетизм и аэронавигация, 1962, т. II, № 1, с. 153—160.
32. Иванов К. Г. О высоте взрыва Тунгусского метеорита.— Астроном. журнал, 1963, т. 40, вып. 2, с. 329—331.
33. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения.— Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 141—151.
34. Идлис Г. М., Карягина З. В. О кометной природе Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1961, вып. 21, с. 32—43.
35. Ильин А. Г., Воробьев В. А., Байер В. В. Связь параметров поражений веток лиственных со световой энергией.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 105—109.
36. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов.— Тр. Сибирского физ.-техн. ин-та при Томском ун-те, 1962, вып. 41, с. 87—91.
37. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 187—194.
38. Компанеев А. С. Точечный взрыв в неоднородной атмосфере.— Докл. АН СССР, 1960, т. 130, № 5, с. 1001—1003.
39. Коробейников В. П., Путнян В. В., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Об эффекте излучения в неоднородной атмосфере при Тунгусском падении.— В кн.: Труды IV Всесоюзной конференции «Динамика излучающего газа», т. II. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 115—123.
40. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О зоне наземных разрушений при воздушном взрыве крупного метеорита.— Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1974, № 3, с. 94—100.
41. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Об ударных волнах при полете и взрыве метеоритов.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 20—46.
42. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 54—65.
43. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 115—137.
44. Куцаев А. С. Сверхзвуковое обтекание большого тела в экспоненциальной атмосфере.— Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1978, № 3, с. 158—161.
45. Куцаев А. С. Движение в атмосфере газовых тел малой плотности.— Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1978, № 2, с. 89—93.
46. Куцаев А. С. Движение деформируемых тел малой плотности в экспоненциальной атмосфере. Автореф. канд. дис.— М., 1982.— 16 с.
47. Львов Ю. А., Васильев Н. В. Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 53—57.
48. Мартынюк М. М. Роль фазового взрыва космического вещества в процессе разрушения метеоритов.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 168—177.
49. Маслов Е. В. К вопросу о высоте и мощности взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 105—112.

50. Мирский В. Н., Стулов В. П. Лучистый теплообмен головной части тела при интенсивном испарении.— Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа, 1975, № 2, с. 190—192.
51. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизированные газы.— М.: Мир, 1976.— 496 с.
52. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита/Васильев Н. В., Журавлев В. К., Журавлева Р. К. и др.— М.: Наука, 1965.— 112 с.
53. Обашев С. О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита.— Метеоритика, 1961, вып. 21, с. 49—51.
54. Пасечник И. П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 24—54.
55. Петров Г. И., Стулов В. П. Движение больших тел в атмосферах планет.— Космические исследования, 1975, т. XIII, вып. 4, с. 587—594.
56. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О геомагнитном эффекте взрыва Тунгусского метеорита.— Изв. вузов. Физика, 1960, № 2, с. 236—237.
57. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле.— Геол. и геофиз., 1961, № 6, с. 94—95.
58. Покровский Г. И. О взрыве метеорных тел, движущихся в атмосфере.— Метеоритика, 1966, вып. 27, с. 103—108.
59. Разин С. А. Оценка координат источника ожоговых повреждений по распределению интенсивности поражающего действия в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 66—70.
60. Савченко Ю. Н. Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеоритных тел.— Геомагнетизм и аэронавтика, 1975, т. XV, № 6, с. 1047—1053.
61. Савченко Ю. Н. Геомагнитные возмущения, вызываемые ударными волнами крупных метеоритных тел.— Геомагнетизм и аэронавтика, 1976, т. XVI, № 3, с. 518—525.
62. Соляник В. Ф. Метеорит и электрическое поле.— Юный техник, 1959, № 3, с. 64—65.
63. Соляник В. Ф. Тунгусская катастрофа 1908 г. в свете электрической теории метеорных явлений.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 178—187.
64. Станюкович К. П., Бронштэн В. А. О скорости и энергии Тунгусского метеорита.— Докл. АН СССР, 1961, т. 140, № 3, с. 583—586.
65. Фаст В. Г. К определению эпицентра взрыва Тунгусского метеорита по характеру вывала леса.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 97—104.
66. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 40—61.
67. Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А. О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 39—52.
68. Фаст В. Г., Бояркина А. П., Бакланов М. В. Разрушения, вызванные ударной волной Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 62—104.
69. Фесенков В. Г. Проблемы падения Тунгусского метеорита.— Астрон. журн., 1966, т. 43, вып. 2, с. 242—265.
70. Хохриков В. А. О взаимодействии космических тел с атмосферами планет.— Космические исследования, 1977, т. XV, вып. 2, с. 203—207.
71. Ben-Menahem A. Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations.— Phys. of the Earth and Planet. Interiors, 1975, v. 11, p. 1—35.

72. Hunt I. N., Palmer R., Penney S. W. Atmospheric waves caused by large explosions.— Philosophical transactions of Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1960, v. 252, N 1011, p. 275—315.
73. Whipple F. I. W. The great Siberian meteor and waves, seismic and aerial, which it produced.— Quart. J. of the Royal Meteorolog. Soc., 1930, v. 56, p. 287—304.
74. Whipple F. I. W. On phenomena related to the great Siberian Meteor.— Quart. J. of the Royal Meteorolog. Soc., 1934, v. 60, N 256, p. 505—513.

## И. П. ПАСЕЧНИК

### УТОЧНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА 30 ИЮНЯ 1908 г. ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Необходимость повторить расчеты А. В. Вознесенского [4, 5] по определению координат эпицентра взрыва Тунгусского метеорита возникла в связи с выявлением к северо-востоку от Куликовского вывала [14] еще двух районов с недатированными вывалами леса (рис. 1, № 2 и 3), предположительно связанными с падением Тунгусского метеорита. Данные о нарушениях земной поверхности в этих двух районах, основанные на сообщениях очевидцев, приведены в [1, 14, 17 и др.]. В ходе экспедиций Томского университета были обследованы районы эпицентров № 2 и 3 и уточнено их местоположение (устное сообщение А. П. Бояркиной).

Предположение о существовании нескольких эпицентральных районов, возникших в результате Тунгусской катастрофы, вполне допустимо. Известны случаи практически одновременного падения на земную поверхность нескольких частей метеорита, образовавшихся при его распаде в атмосфере Земли. При этом возможен взрыв только одной из его частей.

Насколько известно, никто из исследователей вычислений координат эпицентра Тунгусского взрыва по сейсмическим данным не производил. А. В. Вознесенский в [4, 5] приблизительно определил географические координаты эпицентра взрыва № 1 ( $\varphi = 60^{\circ}16'$  с. ш.,  $\lambda = 103^{\circ}06'$  в. д.) по данным опросных листов, в которых очевидцы из различных мест сообщали о направлении полета метеорита, времени и интенсивности сотрясений, дрожаний, звуковых и световых явлений, возникших в результате этого взрыва. Подобные определения координат по опросным дан-

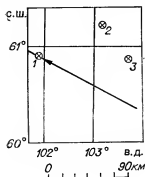


Рис. 1. Схема расположения известного (№ 1) и вновь установленных (№ 2, 3) возможных эпицентров взрыва Тунгусского метеорита. Стрелкой показано направление траектории полета метеорита по [21].

Координаты сейсмических станций и эпицентра Тунгусского землетрясения, принятые при расчетах  $O_{\text{эп}}$ 

Название станции и № эпицентра	Координаты						Источник
	Ф с. ш.			λ в. д.			
	°	'	"	°	'	"	
Иркутск	52	16		104	19		[2]
Ташкент	41	23		69	21		[2]
Тифлис	41	42		44	48		[2]
Йена	50	57	07	11	35	00	[23]
Монса	50	39	38	11	35	00	[23]
№ 1	60	53	09±6	101	53	40±13	[21]

ным позднее провел С. В. Обручев [17] ( $\varphi = 60^{\circ}20'$  с. ш.,  $\lambda = 102^{\circ}06'$  в. д.).

По найденным значениям координат эпицентра взрыва А. В. Вознесенский вычислил эпицентрально расстояние  $\Delta$  до станции Иркутск, где были зарегистрированы сейсмические и воздушные волны от взрыва: 893 км (в действительности  $\Delta = 971,5$  км). Для найденного значения  $\Delta$  по годографу волн  $P$  было определено время пробега  $t_{\text{пр}}$ . Вычитая  $t_{\text{пр}}$  из времени первого вступления сейсмической волны  $t_{\text{вст}}$ , зарегистрированной на станции Иркутск, А. В. Вознесенский рассчитал, что приближенное значение времени в эпицентре Тунгусского взрыва  $O_{\text{эп}} = 00$  ч 17 мин 11 с гринвичского времени.

Естественно, что по данным опросных листов и по словам очевидцев координаты эпицентра взрыва могли быть определены только приближенно. При последующих многочисленных обследованиях района Тунгусского взрыва координаты эпицентра № 1 определялись по центру вывала леса. Первым это сделал Л. А. Кулик (по его расчетам,  $\varphi = 61^{\circ}$  с. ш.;  $\lambda = 101^{\circ}18'$  в. д. [15]), затем А. В. Золотов [9], В. Г. Фаст [21] и др. Координаты эпицентра № 1, которые используются в данной работе, уточнены при последующих обследованиях вывала леса [21]; их значения приведены в табл. 1.

Неоднозначность в точном определении координат эпицентра взрыва разными авторами связана с тем, что он был воздушным и произошел на значительной высоте, к тому же периметр области вывала леса имел сложную конфигурацию.

Автор изучил имеющиеся записи сейсмических и воздушных волн, зарегистрированных при взрыве Тунгусского метеорита, а также многочисленные публикации по данному вопросу. При определении параметров взрыва автор использовал опыт, накопленный при регистрации взрывов [18 и др.]. Были получены следующие результаты [19].

Сейсмические волны землетрясения, вызванного взрывом Тунгусского метеорита, были зарегистрированы на сейсмических станциях Иркутск, Ташкент, Тифлис и Йена. Они представляли собой поверхностные волны Релея  $LR$ . По временам их пробега время в эпи-

центре землетрясения № 1  $O_{\text{эп}} = 00 \text{ ч } 14,5 \pm 0,8$  мин гринвичского времени. Невысокая точность определения  $O_{\text{эп}}$  обусловлена главным образом отсутствием точных данных о групповых скоростях  $V_{\text{гр}}$  волн  $LR$  вдоль трасс эпицентр — сейсмические станции и рядом других факторов. При расчетах  $O_{\text{эп}}$  значения  $V_{\text{гр}}$  брали по дисперсионным кривым, построенным по записям землетрясений в соседних районах вдоль трасс, не совпадающих с трассами Тунгусского землетрясения. По записям воздушных волн время взрыва удается определить с еще меньшей точностью [1, 4, 9, 18 и др.].

По отношениям амплитуд к периодам максимальных колебаний в волнах  $LR$  сделаны оценки магнитуды Тунгусского землетрясения  $MZ$ : ее значения лежат в пределах от 4,5 до 5,0 по шкале [3].

Точное и однозначное определение тротилового эквивалента  $Q$ , высоты и времени взрыва по совокупности имеющихся сейсмических, микробарографических и других геофизических данных, а также по площади вывала леса произвести нельзя. Обоснованно можно сделать только оценки минимальных и максимальных значений указанных выше величин.

По интенсивности и динамическим характеристикам сейсмических и воздушных волн, а также по площади вывала леса значения  $Q$  лежат в пределах от 30 до 50 Мт. При условии, что  $MZ = 4,5$  Мт и  $Q = 30$  Мт, высота  $h = 6,2-7,3$  км, при  $Q = 50$  Мт  $h = 7,3-9,2$  км. При  $MZ = 5,0$  Мт и  $Q = 30$  Мт высота  $h = 2,5-4,4$  км, при  $Q = 50$  Мт  $h \sim 3,3-5,2$  км. По найденным оценкам  $Q$ ,  $h$  и  $O_{\text{эп}}$  сделаны оценки времени взрыва  $O_{\text{взр}}$ . При  $h = 2,5-9,2$  км и  $Q = 30-50$  Мт  $O_{\text{взр}}$  на 2—20 с меньше времени в эпицентре.

В последнее время стало возможным построить дисперсионные кривые групповых скоростей волн  $LR$  вдоль трасс, практически совпадающих или близких к трассам волн, зарегистрированных при Тунгусском землетрясении. Это позволило уточнить  $O_{\text{эп}}$  и  $O_{\text{взр}}$ , а также определить наиболее вероятное положение эпицентра Тунгусского взрыва.

Точно определить координаты эпицентра Тунгусского взрыва по сейсмическим данным, даже используя скорректированные данные о групповых скоростях волн  $LR$ , нельзя. Это обусловлено тем, что записи волн  $LR$  получены на малом числе станций, расположенных в узком диапазоне азимутов (от 170 до 300°) (табл. 2), малой

Таблица 2

Эпицентральные расстояния  $\Delta^i$  (км) и азимуты  $Aз^i$  от эпицентра на станцию

Название станций	Эпицентр					
	№ 1		№ 2		№ 3	
	$\Delta$	$Aз^\circ$	$\Delta$	$Aз^\circ$	$\Delta$	$Aз^\circ$
Иркутск	971,5	172	997,6	176,3	995,0	173,5
Ташкент	3097,6	240	3167,4	241,4	3175,4	242,8
Тифлис	4337	267	4408,4	268	4438,0	268,9
Йена	5295,7	301,0	5338,7	301,7	5384,6	302,3



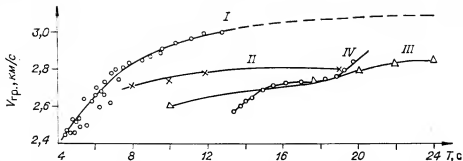


Рис. 2. Дисперсионные кривые волн  $LR$  вдоль трасс (I—IV), близких к трассам Тунгусского землетрясения.

I и II — трассы, идущие от эпицентра землетрясения, расположенного севернее эпицентра № 1, до станции Иркутск и Ташкент; III — трасса эпицентра землетрясения (8, 16) 5 января 1967 г. ( $O = 00$  ч 14 мин 41 с,  $\varphi = 48^\circ$  с. ш.;  $\lambda = 103^\circ$  в. д.) — станции Москва (действующая ныне вместо станции Яена); IV — трасса эпицентры в Средней Азии — станция Тбилиси, по [6].

точностью определения времени вступлений волн и периодов их колебаний, отсутствием поправок на ход хронометров и рядом других факторов.

При известных координатах трех эпицентров с использованием уточненных дисперсионных кривых можно по сейсмическим данным определить наиболее вероятный из эпицентров Тунгусского землетрясения. Это устанавливают по наилучшей сходимости времен в эпицентре, которые вычисляют для каждой станции для всех эпицентров по временам пробега волн  $LR$  с учетом значений  $V_{гр}$ , найденных по уточненным дисперсионным кривым.

**Построение уточненных дисперсионных кривых.** Построение кривых волн  $LR$  для трасс, близких к трассам распространения этих волн при Тунгусском землетрясении, производили на станциях Иркутск и Ташкент по записям, полученным на этих станциях при одном и том же землетрясении. Его эпицентр располагался севернее эпицентра № 1. Магнитуда землетрясения  $MZ$  составляла 4,4. Эпицентральные расстояния до станций Иркутск и Ташкент составляли соответственно 1884 и 2991 км.

Дисперсионные кривые для станции Иркутск (рис. 2, кривые I, II) строили по записям волн  $LR$ , зарегистрированных вертикальным сейсмографом СВК, имевшим увеличение на периодах 2—4 с порядка  $V_0 = 1000$ , а для станции Ташкент — на длиннопериодном вертикальном сейсмографе с увеличением  $V_0 = 700$  в диапазоне периодов от 18 до 50 с.

Из-за небольшой интенсивности землетрясения и малого увеличения сейсмографа СВК дисперсионную кривую для станции Иркутск удалось построить только в диапазоне периодов от 5 до 15 с. Поэтому значения  $V_{гр}$  при расчетах времен пробега  $t_i^L$  волн  $LR$  от эпицентра до станции для периодов  $T$  колебаний в 20—22 с (такие периоды колебания зарегистрированы при Тунгусском землетрясении) были

Расчет времени в эпицентрах № 1, 2, 3

Станция	Период $T_i$ , с	Время поступления $t_i$		$V_{гр}$ , км/с	Время в эпицентрах $O_i$ эп					
					№ 1		№ 2		№ 3	
		ч	мин		ч	мин	ч	мин	ч	мин
Иркутск Ташкент Тифлис Пена	35—40	00	18,2	3,40—3,48	00	13,50±0,05	00	13,37±0,06	00	13,57±0,05
	20—22	00	18,8	3,08—3,10	00	13,56±0,02	00	13,97±0,06	00	14,17±0,05
	15—20	00	32	2,78—2,80	00	13,50±0,07	00	13,08±0,07	00	13,03±0,07
	15	00	40,8	2,65—2,7	00	13,78±0,25	00	13,33±0,26	00	13,15±0,26
	19	00	46,0	2,70—2,75	00	13,61±0,30	00	13,34±0,30	00	13,06±0,30
					$O_{эп}^{ср} =$		13,50±0,08		13,42±0,22	
									13,40±0,38	

определены по экстраполированной в область более длинных периодов дисперсионной кривой 1. Для колебаний с периодами 35—40 с, также зарегистрированных на станции Иркутск при Тунгусском землетрясении, значения  $V_{гр}$  при расчетах  $t_i^j$  были взяты по дисперсионным кривым, построенным для евразийских платформенных районов [18]. Значения  $V_{гр}$ , принятые при расчетах  $t_i^j$ , приведены в табл. 3.

Для трассы эпицентр — станция Тифлис значения  $V_{гр}$  для волн  $LR$  были взяты по дисперсионной кривой, построенной по землетрясениям, эпицентры которых располагались в Средней Азии (см. рис. 2, кривая IV) [6]. Значения  $V_{гр}$  практически совпали со значениями, ранее определенными в [7].

При построении дисперсионной кривой волн  $LR$  для трассы, близкой к трассе эпицентр № 1 — станция Йена, были использованы записи афтершоков Мондинского землетрясения 5 января 1967 г. в 00 ч 14 мин 41 с и других [8, 16], зарегистрированных на станции Мокса (действующей ныне вместо станции Йена). Записи были получены на длиннопериодных приборах типа  $VSj-1/L$ , имевших  $T_0 = 30$  с,  $T_g = 87,7$  с, увеличение  $V_0 = 1100$ .

**Вычисление  $O_{эп}$ .** Значение  $O_{эп}$  для каждой станции вычислялось из соотношения  $O_{эп}^i = t_i - t_i$ , где  $t_i$  — времена регистрации волн  $LR$  на станциях ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), приведенные в табл. 3;  $t_i$  — расчетные времена пробега волн  $LR$  от эпицентров  $j$  (№ 1, 2, 3), вычисленные по соотношению  $t_i = \Delta_i / V_{гр}$  ( $\Delta_i$  — расстояния от эпицентров № 1, 2, 3 до станций, см. табл. 2),  $V_{гр}^i$  — значения групповых скоростей для соответствующих станций по уточненным дисперсионным кривым. Их значе-

ния для зарегистрированных периодов колебаний приведены в табл. 3. Значения  $V_{гр}$  для колебаний данного периода могли быть установлены только в определенных границах. Поэтому в табл. 3 указаны среднеарифметические значения  $O_{эп}$ . Подобные расчеты  $O_{эп}$  выполнялись ранее в ряде работ [20, 22 и др.], но точность сделанных определений мала.

Определение по сейсмическим данным наиболее вероятного положения эпицентра Тунгусского землетрясения. По найденным значениям  $V_{гр}$  волн  $LR$  для зарегистрированных периодов  $T_i$  колебаний на каждой из четырех сейсмических станций Иркутск, Ташкент, Тифлис и Йена (см. рис. 2, табл. 3) для эпицентров № 1, 2, 3 по формуле  $O_{эпj}^i = t^i - \Delta^i / V_{гр}^i$  вычисляют значения времен в очаге  $O_{эпj}^i$  ( $j = 1, 2, 3$ ). Затем по найденным значениям  $O_{эпj}^i$  на четырех станциях для каждого эпицентра вычисляют среднее значение времени в эпицентре  $O_{эпj}^{ср}$ . Расчетные данные для эпицентров № 1, 2, 3 приведены в табл. 3.

При сравнении значений  $O_{эп}^i$  и  $O_{эп}^{ср}$  видно, что для эпицентров № 2, 3 отклонения значительно больше, чем для эпицентра № 1. Лучшее согласование значений  $O_{эп}^i$  с  $O_{эп}^{ср}$  для эпицентра № 1, а также наличие в этой области вывала леса, ожога ветвей деревьев позволяют сделать заключение, что наиболее вероятным местом взрыва Тунгусского метеорита является эпицентр № 1, т. е. центр Куликовского вывала леса.

Следует отметить, что сделанные расчеты не могут служить доказательством того, что подобные взрывы или падения отдельных частей метеоритов не произошли в эпицентрах № 2 и 3 или в других районах, расположенных восточнее или северо-восточнее эпицентра № 1. Дело в том, что эпицентр № 1, над которым произошел Тунгусский взрыв, расположен на 40—90 км ближе к станциям, чем эпицентры № 2 и 3. Поэтому сейсмические волны  $LR$  от возможных взрывов или падений отделившихся частей метеорита в районах эпицентров № 2 и 3 должны были прийти на станции на 12—33 с позже, чем волны  $LR$  из эпицентра № 1. Выделить эти волны на фоне ранее вступивших колебаний от землетрясений в эпицентре № 1 на имеющихся записях не представляется возможным. Поэтому наиболее эффективен для определения возможных эпицентров взрывов или мест падений частей метеорита, по-видимому, избранный экспедицией Томского университета поиск сохранившихся нарушений земной поверхности (в наиболее интересных районах целесообразно провести магнитометрическую съемку).

Уточнение времени запаздывания магнитного эффекта при Тунгусском взрыве. В работах [10—13 и др.] сделаны оценки времени запаздывания  $\Delta t_m$  магнитного эффекта, зарегистрированного на магнитограмме обсерватории в Иркутске после Тунгусского воздушного взрыва. Согласно данным [11], время начала изменений  $H$ - и  $Z$ -составляющих магнитного поля Земли отмечено на магнитограмме в 00 ч 20,2  $\pm$  0,2 мин григорианского времени.

В более ранней работе [10] указано, что  $t_m = 00$  ч 19,5 мин. Мак-

симальное изменение  $H$ -составляющей магнитного поля достигло 70 гамм. Указанное выше изменение магнитного поля Земли автор работ [10, 11] связывает с воздействием на ионосферу воздушных волн, возбужденных Тунгусским взрывом.

Значение  $\Delta t_m$  вычисляли как разность времен в эпицентре Тунгусского взрыва  $O_{эп}$  и времени  $t_m$  начала изменений магнитного поля Земли, т. е.  $\Delta t_m = O_{эп} - t_m$ . При этих расчетах принимали, что время взрыва совпадает со временем в эпицентре. Значения  $O_{эп}$  определяли по сейсмическим записям неточно. Так, например, в различных работах значения  $O_{эп}$  указываются в пределах от 00 ч 12,5 мин [22] до 00 ч 15,1 мин [20]. Поэтому естественно, что значения  $\Delta t_m$ , вычисленные различными авторами по сейсмическим данным, значительно (на 2—3 мин) различаются. По записям воздушных волн  $O_{эп}$  рассчитывали еще менее точно. Столь неточные определения  $O_{эп}$ , по-видимому, явились причиной того, что авторы ряда работ высказали, с нашей точки зрения неправильное, предположение об отсутствии запаздывания магнитного эффекта. Эффект запаздывания, безусловно, существует, что подтверждают исследования последних лет, и, по нашим расчетам, значение  $\Delta t_m$  лежит в пределах от  $5,9 \pm 0,2$  мин при  $t_m = 00$  ч  $19,5 \pm 0,2$  мин и до  $6,6 \pm 0,2$  мин при  $t_m = 00$  ч  $20,2 \pm 0,2$  мин.

Более точные оценки  $\Delta t_m$  с учетом высоты и мощности Тунгусского взрыва затруднены, поскольку точность измерения и расчета исходных величин  $t_m$ ,  $O_{эп}$  и  $O_{взр}$  мала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович И. С. Новые материалы по полету большого метеорита 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири.— *Астроном. журн.*, 1933, т. 10, вып. 4, с. 465—486.
2. Бюллетень Постоянной Центральной сейсмической комиссии, Р. А. Н., 1908, январь — сентябрь/Под ред. Г. В. Левницкого. — Сиб., 1910—113 с.
3. Ванек П., Затонек А., Карник В. и др. Стандартизация шкал магнитуд.— *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.*, 1962, № 2, с. 153—158.
4. Вознесенский А. В. Падение метеорита 30 июня 1908 г. в верховьях р. Хатанги.— *Мироведение*, 1925, т. 14, № 1, с. 25—38.
5. Вознесенский А. В. Хатангский метеорит 30 июня 1908 г. и отметка его падения сейсмографами в Иркутске.— *Природа*, 1925, № 4-5, с. 113—114.
6. Гоголадзе Т. Н. Модель строения коры и верхней мантии на трассе Средняя Азия — Кавказ.— *Сообщения АН ГрузССР*, 1981, т. 102, № 1, с. 57—59.
7. Гют Д., Хартер Д. Исследование океанического и континентального строения земной коры по дисперсии поверхностных волн.— *Изв. АН СССР. Физ. Земли*, 1970, № 10, с. 71—78.
8. Землетрясения в СССР.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— 412 с.
9. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.— Минск: Наука и техника, 1969.— 202 с.
10. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита.— *Метеоритика*, 1961, вып. 21, с. 46—48.
11. Иванов К. Г. Момент взрыва Тунгусского метеорита и время запаздывания геомагнитного эффекта.— *Геомагнетизм и аэронавигация*, 1965, т. V, № 6, с. 1119—1120.
12. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов.— *Тр. Сибирского физ.-техн. ин-та при Томском ун-те*, 1962, вып. 41, с. 87—92.

13. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 187—195.
14. Коненкин В. Г. Сообщение очевидцев о Тунгусском метеорите 1908 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 31—35.
15. Кулик Л. А. К вопросу о месте падения Тунгусского метеорита 1908 года.— Докл. АН СССР. Сер. А, 1927, № 23, с. 399—402.
16. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР.— М.: Наука, 1977.— 556 с.
17. Обручев С. В. О месте падения большого Хатангского метеорита 1908 года.— Мирведение, 1925, т. 14, № 1, с. 38—40.
18. Пасечник И. П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях.— М.: Наука, 1970.— 191 с.
19. Пасечник И. П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 24—53.
20. Тресков А. А. К вопросу о сейсмических волнах, сопровождавших падение Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г.— Астроном. журн., 1934, т. 11, № 6, с. 597—599.
21. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 40—60.
22. Martin H. Die Tunguska — Katastrophe in geophysikalischer Sicht.— Sterne, 1966, v. 42, N3/4, s. 45—51.
23. Seismograph station abbreviations U. S.— Coast and geodetic Survey, Rockville, Maryland, 1967.— 48 p.

В. Д. НЕСВЕТАЙЛО

## ОБ ОДНОМ ТИПЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОРАЖЕНИЙ ДЕРЕВЬЕВ В РАЙОНЕ ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Наряду с вывалом леса термические поражения деревьев в районе падения Тунгусского метеорита являются наиболее заметным и достоверным фактом, подтверждающим необычный характер события 1908 г. Особенно впечатляющей картина была в первые годы после падения метеорита. Л. А. Кулик, давая характеристику термических поражений деревьев в районе катастрофы, отмечал следующие их особенности: «1. Комбинация излома по живой древесине с одновременным, в общем равномерным ожогом всего дерева и ожогом излома — обязательно... 2. В центральной части бурелома, измеряемой радиусом в 10—15 км, обязателен ожог верхушек деревьев, если только они не были укрыты местностью или особенно высокой и густой тайгой. 3. Ожог центральной части бурелома поражает своей сплошностью: он охватил и горы, и долины, и болота, и изолированные водой участки суши. 4. Степень ожога является исключительно однообразной и неизменной и на горах, и в долинах, и на изолированных водой участках суши, и на отдельных деревьях среди огромных болот, и на берегах рек, отдаленных друг от друга широкими плесами. 5. Ожог чрезвычайно характерен: умерщвлены кроны (камби-

альный слой — при наличии тонкой коры) и обуглены места, не защищенные или плохо защищенные корой и камбием (поверхности излома веток, вершин и проч.)... 7. В некоторых случаях деревья обожжены целиком: от вершины до корневой системы включительно» [6]. Справедливо полагая, что указанные поражения не могли образоваться при обычном лесном пожаре, Л. А. Кулик считал причиной их появления воздействие урагана раскаленных газов, выделившихся при падении метеорита.

Исследования ожоговых поражений ветвей и стволов деревьев, выполненные в последующие годы, в целом подтверждают реальность описанной Л. А. Куликом картины, и многие из приведенных фактов хорошо объясняются с позиций гипотезы о мощном световом излучении, сопровождавшем высотный взрыв тела.

По нашему мнению, весь комплекс термических поражений по характеру пространственной локализации на деревьях можно разделить на три основные группы (типа):

1) специфические поражения ветвей, переживших катастрофу деревьев, существование которых, наряду с показаниями очевидцев [1], свидетельствует о мощном световом излучении во время взрыва [2, 3];

2) пожарные подсушины 1908 г. на стволах живых деревьев, нагар на коре живых и погибших деревьев, обугливание и пожарные раковины на стволах деревьев, бывших в 1908 г. уже сухими, — следы пожара, возникшего в результате возгорания лесных горючих материалов от световой вспышки [7, 8, 13];

3) термические поражения торцов обломанных ударной волной ветвей на погибших в 1908 г. деревьях-«стояках». Эти поражения Е. Л. Кринов рассматривал как самую характерную особенность ожога растительности на месте падения метеорита [5].

В связи с необходимостью оценки доли лучистой энергии в общей энергии взрыва внимание исследователей в основном было направлено на изучение первых двух групп термических поражений. Что касается третьей группы, то, кроме вышеприведенного наблюдения Л. А. Кулика об обязательности ожога и обугливания поверхности излома веток, в литературе имеется еще свидетельство Е. Л. Кринова о том, что «на всех концах обломанных ветвей и сухостоя всегда имеется уголек, причем самый излом всегда направлен книзу и идет косо» [5]. (Для краткости поражения такого типа будем называть «угольком».) Е. Л. Кринов указывает также, что «уголек» на торцах обломанных ветвей распространяется вплоть до вершины деревьев, а соседство толстых и тонких ветвей с «угольком» рассматривает как свидетельство мгновенности ожога, происшедшего в результате взрыва, а не обычного лесного пожара.

Таким образом, складывается впечатление, что поражение данного типа на стволах погибших в 1908 г. деревьев имеет сплошной характер, т. е. распространено по всей площади ожога растительности и распределяется равномерно по стволу до самой вершины деревьев. Это впечатление как будто подтверждается и в настоящее время при беглом обследовании «стояков», в большом количестве со-

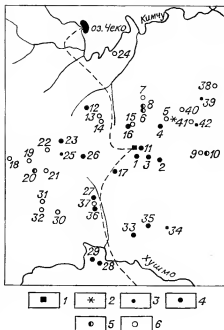
# Карта-схема расположения пробных площадок.

1 — Иебы Кулика; 2 — высота Фаррингтон; 3—6 — пробные площадки: 3 — «стояков» 1908 г. не обнаружено, 4 — высота «уголька» 15—20 м, 5 — высота «уголька» до 15 м, 6 — высота «уголька» до 4 м (цифры на рисунке — номера пробных площадок).

хранившихся в районе катастрофы. В связи с тем, что представление о сплошном распространении поражений этого типа используется как один из важных аргументов в некоторых гипотезах о физической и химической природе Тунгусского метеорита [9, 11], назрела необходимость проверки правильности этого представления.

Для того чтобы понять причины образования «уголька», необходимо выяснить размер области его распространения, характер распределения по площади и по высоте на стволах деревьев, установить дату гибели пораженных деревьев и время образования поражений и определить, в каком состоянии (живые, мертвые, сухие) были ветви в момент получения поражения. Полевые работы проводились на пробных площадках размером от 0,04 до 0,25 га, выделяемых в заданной точке района \*. Всего в центральной части района катастрофы заложены 42 пробные площадки на территории примерно 80 км<sup>2</sup> (рисунок). На пробной площадке делали краткое геоботаническое описание и обследовали все находящиеся на ней «стояки». Наличие термического поражения определяли по слою угля на торцах остатков ветвей, мощность (толщина) которого достигает иногда 3 мм. В тех случаях, когда уголь за давностью лет выветрился и не обнаруживается при внешнем осмотре, следы его бывшего присутствия определяли по характерному темно-коричневому цвету древесины, который прослеживается на глубину 2—3 мм от поверхности излома ветки. После выяснения общей картины распределения «уголька» проводили подробное описание 3—4 «хлыстов» (деревья-«стояки» с обломанными ветвями, но сохранившие верхнюю часть ствола) с учетом параметров, указанных в таблице.

Термические поражения исследовали не только у стоящих на корню «стояков», но и у тех, которые в последнее время уже упали



\* В сборе материала помимо автора участвовали члены Комплексной са-модетальной экспедиции 1981 г. (КСЭ-23) А. И. Осипов, И. В. Кинийкин, В. М. Хаернасов, А. И. Попов.

**Распределение термических поражений**

№ пробных площадей по кустов	Месторасположение	Формула современного леса	Признаки типового пожара	Порода
1	2	3	4	5
1	Подножие западного склона высоты Стойкович, 350 м южнее Изб Кулика	5Л4Б4С	+	Л
2	Юго-восточный склон высоты Мухин	400с + С + Л	+	Л
3	Западное подножие высоты Мухин	9Б1С + Л	+	Л, С
4	Юго-западный склон высоты Фаррингтон, 0,5 км по тропе ниже вершины	9Л3С3Б	+	Л, С
5	Высота Фаррингтон, курумник	—	+	Л
6	Середина южного склона высоты Бол. Лысой	50с3С2Л	+	С, Л
7	Северный склон высоты Бол. Лысой, 300 м ниже вершины	8Б2Л	+	С
8	Вершина высоты Бол. Лысой	5С3Л2Б	+	Л
9	2,6 км восточнее высоты Мухин	Верхнее болото	+	Л
10	100 м восточнее пробной площадки У—9	5Л4Б	+	Л
11	Западный склон высоты Стойкович, 50 м ниже вершины	8Л2С	+	Л
12	Северо-западный склон высоты Вюльфнг	4Б3Л30с	+	Л
13	Вершина высоты Вюльфнг	5Л4С1Б	+	С, Л
14	Юго-восточный склон высоты Вюльфнг, 300 м от вершины	3Б3Л2С20с	+	С, Л
15	Северо-восточная оконечность Кобаева острова	Верхнее болото	+	Л
16	50 м восточнее пробной площадки У—15	5Л3С2Б	+	Л
17	1,5 км юго-западнее Изб Кулика	5Л3С2Б + К	+	Л
18	1,5 км западно-северо-западнее высоты Кларк	4Б2С2Л2Е	+	Л, С
19	Западно-северо-западный склон высоты Кларк	5Б2Л2Е40л	+	Л
20	Восточный склон высоты Кларк, 20 м от вершины	3С30с2Б + Л	+	С
21	Восточный склон высоты Кларк, 500 м от вершины	5Б3Е2Л + К	+	С, Л
22	Северо-западный склон высоты Острой, 50 м от вершины	5Б40л1Л	+	С, Л
23	0,8 км северо-восточнее высоты Острой	3С3Б20с20л	+	С, Л
24	Терраса р. Хушмо у «Лаборатории»	Не опр.	+	Л
25	0,7 км юго-восточнее вершины высоты Острой	6Л4Б + С + К	+	
26	1,8 км восточнее высоты Острой	5Л5Б	+	С, Л
27	0,5 км северо-северо-западнее Чургимского водопада	7Л3Б	+	С, Л



Характеристика стоянков и локализация термических поражений

Максимальная высота, м	Максимальный диаметр, см	Минимальная высота расположения сухих ветвей, м		Максимальная высота расположения сухих ветвей, м		Минимальная высота расположения живых ветвей, м	Наличие термических поражений на живых ветвях
		без «уголька»	с «угольком»	без «уголька»	с «угольком»		
6	7	8	9	10	11	12	13
18,0	30	—	1,5	15,0	15,0	4,9	—
19,0	33	—	3,3	19,0	19,0	8,3	—
19,6	45	—	1,5	19,0	19,0	12,0	—
17,0	38	—	8,0	15,0	15,0	8,7	—
13,0	26	—	3,5	13,0	3,5	Не опр.	—
20,0	45	—	2,5	20,0	11,0	»	—
13,0	16	4,5	—	13,0	—	»	—
8,5	13	—	0,5	8,5	8,5	»	—
9,0	21	0,7	—	9,0	—	»	—
20,0	30	—	4,0	20,0	8,0	»	—
18,5	26	—	3,2	18,5	16,5	10,0	—
18,0	40	—	4,0	18,0	18,0	Не опр.	—
11,0	24	—	2,0	11,0	4,0	»	—
26,0	30	4,8	—	26,0	—	»	—
11,4	26	1,5	—	11,4	—	10,0	—
18,0	23	—	2,8	18,0	16,5	5,6	—
18,5	30	—	3,5	18,0	18,0	6,5	—
18,0	25	3,0	—	18,0	—	6,0	—
21,0	24	4,2	4,0	18,0	4,0	Не опр.	—
12,0	16	—	2,5	11,0	7,0	5,0	—
20,0	26	4,8	—	20,0	—	Не опр.	—
13,0	18	3,0	—	13,0	—	8,8	—
18,0	23	—	5,0	18,0	18,0	8,8	—
22,0	35	3,5	—	20,0	—	Не опр.	—
Стояков 1908 г. не обнаружено							
20,0	21	—	2,5	20,0	20,0	6,5	—
17,0	26	—	0,2	17,0	17,0	Не опр.	—

1	2	3	4	5
28	Юго-восточный склон высоты в излучине р. Хушмо, 0,6 км юго-западнее устья руч. Чургим	7ЛЗБ + Е	+	Л
29	Вершина высоты в излучине р. Хушмо, 0,6 км юго-западнее устья руч. Чургим	7Л2С1Б	+	С
30	Юго-восточный склон высоты 476, 0,5 км от вершины	5Б4Л1Е	+	Л
31	Северо-западный склон высоты 476	4ЛЗБЗС	+	Л
32	Юго-восточный склон высоты 476	4ЛЗБЗС	+	Л
33	1,5 км западно-юго-западнее высоты 486	5Л4Б1С	+	С
34	1 км восточнее вершины высоты 486	Не опр.	+	
35	Вершина высоты 486	7Л2Б1С	+	С
36	0,4 км северо-северо-западнее Чургимского водопада, юго-восточный склон гребня	7БЗЛ + С	+	Л
37	40 м от пробной площадки У-36, пологий северо-западный склон	8Б2Л + К	+	Л
38	2,5 км северо-восточнее высоты Фаррингтон, северо-северо-восточный склон	6Б4Л + Ол	+	С, Л
39	Вершина высоты в 2 км северо-восточнее высоты Фаррингтон	4ЛЗБЗС	+	
40	Высота в 1 км северо-восточнее высоты Фаррингтон, южный склон	3ЛЗС2Б20с	+	С
41	Высота в 1,3 км восточно-юго-восточнее высоты Фаррингтон, северо-западный склон	5Б4Л1С	+	Л
42	Вершина высоты в 1,3 км восточно-юго-восточнее высоты Фаррингтон		+	

Примечание. Л — лиственница, Б — береза, С — сосна, Е — ель, ОС — осн

на землю. Время падения «хлыста» в каждом конкретном случае оценивали по сумме признаков на поврежденной в результате падения кустарниковой и древесной растительности. Во многих случаях дату падения «хлыста» можно установить с точностью до года — по числу годовичных колец, образовавшихся на поврежденном дереве после падения «хлыста». Дата гибели деревьев, образующих в центральной части области вывала зону «телеграфного леса», определена автором ранее дендрохронологическим методом [10]. Как и следовало ожидать, подавляющее большинство типичных для района «стояков», в том числе и «хлыстов», образовалось в 1908 г.

Для выяснения состояния ветвей в момент поражения важно следующее. Известно, что у хвойных нижние ветки по мере роста дерева постепенно отмирают и ниже живой части кроны образуется зона мертвых, сухих ветвей, которые десятилетиями сохраняются на стволе, постепенно обламываясь под воздействием атмосферных агентов. У перестойных или угнетенных деревьев сухие ветви имеются и в жи-

6	7	8	9	10	11	12	13
20,0	20	—	2,5	20,0	20,0	Не опр.	—
18,0	30	—	4,0	15,0	15,0	7,0	—
24,0	47	4,2	—	22,0	—	Не опр.	—
24,0	46	6,5	—	24,0	—	9,3	—
21,0	37	9,0	—	21,0	—	13,0	—
20,0	30	—	6,5	20,0	20,0	10,0	—
Стояков 1908 г. не обнаружено							
20,0	30	—	2,0	20,0	20,0	Не опр.	—
13,0	17	3,5	4,5	15,0	15,0	7,5	—
20,0	Не опр.	5,0	—	20,0	—	9,5	—
20,0	30	3,0	—	18,0	—	Не опр.	—
Стояков 1908 г. не обнаружено							
20,0	30	5,0	—	15,0	—	Не опр.	—
14,0	20	4,0	—	20,0	—	»	—
Стояков 1908 г. не обнаружено							

на, О.П — ольха, «—» — признаков нет, «+» — признаки есть.

вой части кроны, практически у самой вершины. Основная же масса «хлыстов» — это стволы лиственницы, возраст которых к моменту гибели составлял 150—300 лет, низкого бонитета, имевшие в последние десятилетия очень малый прирост — средняя ширина годовичных колец не превышала 0,3—0,4 мм [10]. Понятно, что крона у таких деревьев была слабая, с большим количеством сухих ветвей в живой части кроны. В то же время следует учитывать, что благодаря наличию покоящихся почек лиственница обладает способностью образовывать новые ветви практически в любой части кроны. Таким образом, сухие в 1908 г. ветви могут быть на «хлыстах» не только в нижней части кроны, но и практически на самой вершине. И наоборот, живые ветки могут встречаться в нижней части ствола.

Хотя с момента гибели деревьев прошло уже более 70 лет, «хлысты» в отличие от вывала хорошо сохранились и можно легко определить, живой или сухой была ветка в момент гибели дерева. Дело в том, что пока ветка жива, камбиальный слой покрывает поверхность

ветки и ствола сплошным непрерывным чехлом, годовичные кольца древесины образуются одновременно, и поэтому переход от ствола к основанию ветки получается плавный, закругленный. После отмирания ветки вновь нарастающие годовичные кольца ствола создают вокруг основания ветки кольцевой валик, превращающийся со временем в образование, напоминающее козырек. Так через несколько лет основание отмершей ветки оказывается погребенным в древесине ствола. Таким образом, по наличию и степени выраженности валика или козырька можно определить состояние ветвей в момент гибели дерева, а по числу годовичных колец, возникших на стволе после отмирания ветки, и точную дату ее усыхания.

Применение этой несложной методики на первой же пробной площадке показало, что «уголек» имеется только на торцах тех ветвей, которые в 1908 г. были уже сухими. Для примера приводим полевые описания, выполненные на площадках, где «уголек» на сухих ветвях распространяется на большую высоту от поверхности земли.

**Площадка У—1.** Подножие западного склона высоты Стойкович, 300—350 м южнее Изб Кулика. Березово-лиственничный кустарниково-зеленомошный лес. Формула леса 5Л4Б1С.

**У—1-1.** «Хлыст» лиственницы. Стоял на корню. Высота  $H = 14$  м, диаметр  $D = 17$  см. Остатки сухих ветвей начинаются с 3 м, первые живые ветви встречаются на высоте 8 м. На высоте 11,5 м имеются две противоположно направленные ветки одной мутовки. Одна из них в 1908 г. была сухой, другая живой. На торце сухой ветви уголь мощностью 1,5—2 мм, живая ветка без следов термического поражения. «Уголек» на сухих ветвях до высоты 13 м, выше только живые ветки без «уголька».

**У—1-2.** «Хлыст» лиственницы, упавший в 1975 г.  $H = 15$  м,  $D = 30$  см. Первые сухие ветви на высоте 1,5 м. Живые ветви начинаются с 4,9 м, их торцы без «уголька». На высоте 10,6 м торцы сухих ветвей с «угольком», живые ветви без него. На высоте 14—15 м обуглены также только торцы сухих ветвей.

**У—1-3.** «Хлыст» лиственницы. Упал около 10 лет назад.  $H = 18$  м,  $D = 25$  см. На высоте 15 м сухие ветки диаметром 1,5 см имеют на торцах «уголек». Торцы тонких сухих дочерних веточек на живых ветвях также обуглены. На высоте 18 м торцы сухих веток имеют слабые следы «уголька».

**Площадка У—2.** Юго-восточный склон высоты Мухия, 200 м вправо от восточного разреза. Курумник. Осиновый разреженный кустарниково-зеленомошно-лишайниковый лес. Формула леса 100с + С + Л.

**У—2-1.** «Хлыст» лиственницы, упавший в 1975 г. (установлено по годовым кольцам осины, поврежденной при падении этого «хлыста»).  $H = 18$  м,  $D = 25$  см. На коре до высоты 3,8 м сохранились «угольки», далее коры нет. Первая сухая ветка на высоте 4,2 м с «угольком». На высоте 7,5 м первая живая ветка, у основания которой имеется остаток сухой веточки меньшего диаметра. На торце сухой ветки уголь мощностью до 2 мм. На живой ветке следов угля нет, нет даже характерного потемнения древесины непосредственно под по-

верхностью излома. На высоте 14 м торцы сухих ветвей разного диаметра с мощным «угольком». Так, ветка диаметром 4 см имеет на торце раковины глубиной 1,5 см, со слоем угля в 2,5 мм толщиной. Живой отросток этой же ветки не имеет следов обугливания. «Уголек» на сухих ветвях до высоты 18 м.

У—2-2. «Хлыст» лиственницы, упавший, вероятно, в 1975 г.  $H = 16$  м,  $D = 33$  см. На высоте 3,3 м первая сухая ветка. «Уголек» на сухих ветвях также начинается с 3,3 м. Первая живая ветка на высоте 8,3 м. Следов обугливания нет. Сухие ветки имеют поражения в виде раковин на торцах со слоем угля мощностью до 3 мм. Так, на высоте 9 м ветка диаметром 4 см имеет на торце раковину глубиной 2,5 см, но в то же время остаток живого отростка этой ветки ( $D = 1$  см) не имеет следов обугливания. «Уголек» на сухих ветвях до высоты 16 м.

У—2-3. «Хлыст» лиственницы, упавший в 1975 г.  $H = 19$  м,  $D = 26$  см. Первая сухая ветка на высоте 7,8 м, с «угольком». Живая крона начинается на высоте 11 м. Торцы остатков живых ветвей не обуглены. Сухие ветви имеют «уголек» до высоты 19 м.

У—2-4. «Хлыст» лиственницы упал до 1975 г. — перекрыт упавшим в 1975 г.  $H = 18,4$  м,  $D = 24$  см. На высоте 14—15 м сохранились длинные (до 2 м) ветки. Распределение «уголька» на этих ветках дает материал о характере, интенсивности и направлении термического воздействия. Так, на высоте 15 м на торцах остатков тонких живых дочерних веточек длинной ветки, бывшей в 1908 г. живой, нет даже следов «уголька», а на сухих дочерних ответвлениях он есть, но только на тех, торцы которых направлены вниз. На торцах тонких сухих веточек, направленных вверх, «уголька» нет.

Известно, что процесс зажигания горючего материала проходит в несколько стадий, из которых наиболее длительной и требующей наибольшего количества энергии является стадия сушки влажного растительного материала [4]. Продолжительность стадии сушки в значительной степени зависит от влагосодержания материала, и естественно, что для древесины живых ветвей эта стадия (при прочих равных условиях) должна быть более длительной, чем для древесины отмерших ветвей.

Следы термического поражения на торцах живых в 1908 г. ветвей отсутствуют на всех площадках, и это, по нашему мнению, накладывает определенные ограничения не только на величину теплового импульса, вызвавшего поражения деревьев, но и на отрезок времени, прошедший с момента взрыва до образования поражений. Величина теплового импульса определяется плотностью теплового потока и временем его действия. Так как остатки ветвей разного влагосодержания, находящиеся в непосредственной близости друг от друга, должны были испытывать действие теплового потока одинаковой плотности в течение одинакового промежутка времени, то ограничения величины теплового импульса могут быть обусловлены как плотностью теплового потока, так и временем его действия.

Вопрос о том, что именно ограничило тепловой импульс, может быть решен с учетом распространения «уголька» по высоте после

определения направления действия теплового потока и будет обсуждаться ниже. Что же касается определения времени образования на деревьях «уголька», то здесь важно следующее. Поскольку «уголек» имеется только на сухих ветвях, можно утверждать, что он появился не позднее того момента, когда влагосодержание древесины живых ветвей снизилось до уровня влагосодержания древесины сухих ветвей. Так как стволы остались на корню, то остатки живых ветвей еще долгое время (1—3 года) могли быть во влажном состоянии, несмотря на то что деревья зоны «телеграфного леса» во время взрыва были лишены практически всех ветвей кроны. Известны случаи, когда такие деревья вообще не погибали, сформировав новую крону [5]. Это означает, что в силу индивидуальных особенностей деревьев усыхание «хлыстов» происходило неодновременно, и если бы термическое воздействие имело место на второй или на третий год после взрыва, например в результате обычного лесного пожара, то у части «хлыстов» «уголек» был бы и на торцах живых в 1908 г. ветвей. В действительности этого не наблюдается. Таким образом, учитывая показания очевидцев о возникновении очагов возгорания сразу же после взрыва [12] и наличие пожарных подсушин 1908 г. на деревьях, переживших катастрофу [13], наиболее вероятной датой образования термических поражений можно считать 30 июня 1908 г.

Особенности размещения на обследованной территории площадок с разной высотой «уголька» позволяют утверждать, что исследуемые поражения образовались в результате воздействия теплового потока, направленного от поверхности земли, поскольку в случае действия урагана раскаленных газов [6] или горящего газопылевого кома [9] поражения были бы распределены в пределах площади распространения равномерно и повсеместно. В действительности же они встречаются не везде, а расстояние между площадками с большой высотой расположения «уголька» и такими, где обуглены только самые нижние ветки или «уголек» вообще отсутствует, может быть всего 30—50 м.

Данные, полученные на пробных площадках и при маршрутных обследованиях отдельно стоящих «хлыстов», показывают, что, хотя следы низового пожара встречаются везде, в местах, где в 1908 г., как и сейчас, могли произрастать только очень разреженные древостой или одиночные деревья, т. е. на окраинах болот, в долинах ручьев, на каменистых россыпях, «уголек» не поднимается выше 3—4 м. Так, например, на пробной площадке У—16 в северо-восточной оконечности Кобаева острова «уголек» достигает высоты 16,5 м, а на «хлыстах», расположенных в 40—50 м от нее, в краевой полосе кустарниково-сфагнового болота (пробная площадка У—15) «уголька» нет даже на самых нижних ветвях, хотя кора на стволах обуглена на высоту до 1 м, а остатки сухих в 1908 г. ветвей имеются и на высоте 11 м. Очень показательна в этом плане и пробная площадка У—5, заложенная на курумнике у вершины высоты Фаррингтон. Здесь также обнаруживаются следы низового пожара в виде нагара на коре у основания «хлыстов» и угля на торцах самых нижних ветвей, но «уголек» не распространяется выше 3,5 м. Он отсутствует и там, где

имеются группы деревьев, переживших 1908 г. (пробная площадка У—14), или из-за особенностей рельефа создается повышенная влажность напочвенного покрова (пробная площадка У—37). Главная особенность площадок, на которых «уголек» распространяется до высоты 15—20 м, состоит в том, что на них в 1908 г., как и в настоящее время, произрастали сомкнутые древостой. Однако образование термических поражений на такой высоте вряд ли можно объяснить действием обычного верхового пожара [13], поскольку для его развития необходимо наличие густого, сомкнутого полога крон с определенным запасом горючего материала. В результате взрыва на большей части зоны «телеграфного леса» создавалась невозможная в обычных условиях ситуация, когда практически весь запас горючего растительного материала оказался на поверхности земли, так как часть деревьев была повалена, а у оставшихся на корню были сорваны почти все ветви кроны. В таком случае обычный верховой пожар возникнуть и развиваться не мог. Учитывая действие мощной световой вспышки, можно предполагать, что масса хвои оказалась на земле, уже потеряв часть влаги, и, следовательно, могла легко воспламениться от первичных наземных очагов возгорания.

Сгорание хвои происходит очень быстро, поэтому время действия теплового потока большой мощности было очень ограниченным и тепловой импульс оказался недостаточным даже для обугливания самых нижних ветвей. В дальнейшем горение более крупных элементов кроны, напочвенного растительного горючего материала, поваленных стволов деревьев, погибших от предыдущих пожаров, продолжалось, очевидно, с интенсивностью, не превышающей интенсивность обычного низового лесного пожара.

Таким образом, для развития на большую высоту «уголька» обязательны следующие условия: сомкнутый древостой 1908 г., определенная плотность вывала и нормальная влажность напочвенного покрова.

С позиций предлагаемой схемы механизма образования «уголька» можно полагать, что его распределение по площади содержит информацию о величине тепловой энергии лучистой вспышки взрыва, но получение этой информации затруднено. Для решения такой задачи сбор материала нужно проводить на определенных формах рельефа, с тем чтобы на пробных площадках обязательно соблюдались перечисленные условия.

Предлагаемая схема в принципе может быть проверена оценочными теплофизическими расчетами с использованием соответствующих характеристик и известных закономерностей горения растительных горючих материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф., Разин С. А., Эпикетова Л. Е. Показания очевидцев Тунгусского метеорита.— Деп. в ВИНТИ 24 ноября 1981, № Б350-81.
2. Воробьев В. А., Ильин А. Г., Шкута Б. Л. Изучение термических поражений веток лиственниц, переживших Тунгусскую катастрофу.— В кн.: Про-

- блема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 110—117.
3. Зенкин Г. М., Ильин А. Г. О лучевом ожоге деревьев в районе взрыва Тунгусского метеорита. — Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 129—140.
  4. Конев Э. В. О зажигании лесных горючих материалов. — В кн.: Проблемы лесной пирологии. Красноярск: Красноярск. кн. изд-во, 1975, с. 80—92.
  5. Кринов Е. Л. Тунгусский метеорит. — М.: Изд-во АН СССР, 1949. — 194 с.
  6. Кулик Л. А. Картина вывала и ожога в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 15—19.
  7. Курбатский Н. П. О лесном пожаре в районе Тунгусского падения в 1908 году. — Метеоритика, 1964, вып. 24, с. 168—172.
  8. Курбатский Н. П. О возникновении лесного пожара в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 69—71.
  9. Львов Ю. А. Углерод в составе Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 83—88.
  10. Несветайло В. Д. Дендрохронологическое датирование «стояков» района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 88—94.
  11. Соляник В. Ф. Тунгусская катастрофа 1908 г. в свете электрической теории метеорных явлений. — В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 178—188.
  12. Сулов И. М. Опрос очевидцев Тунгусской катастрофы в 1926 г. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 21—30.
  13. Фурьев В. В. Лесные пожары в районе падения Тунгусского метеорита и их влияние на формирование лесов. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, 1975, с. 72—87.

Е. Д. ЛАПШИНА, П. А. БЛЯХАРЧУК

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ СЛОЯ 1908 г. В ТОРФЕ В СВЯЗИ С ПОИСКОМ ВЕЩЕСТВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Поиск метеоритного вещества — одна из центральных задач проблемы Тунгусского метеорита. Наиболее удобным объектом для этой цели оказался торф верховых болот, образованный сфагнумом фускум [1, 2]. На основании измерений линейных приростов побегов мхов и датировки торфяных пожарных горизонтов была определена наиболее вероятная для 1965—1975 гг. глубина залегания катастрофического слоя 1908 г. в 30—33 см от поверхности моховой дернины. Отмечалось, что эта глубина может значительно варьировать в зависимости от местных причин, в частности от локальных условий нарастания и отторфывания моховой дернины. С течением времени, по мере накопления торфа, слой 1908 г. как бы погружается в торфяную залежь и в настоящее время находится глубже, чем 15—20 лет назад. Поэтому 12—14 трехсантиметровых слоев уже недостаточно.

На современном этапе поиска и изучения вещества Тунгусского метеорита, когда большинство образцов торфа подвергается трудо-



емкой обработке и сложным дорогостоящим физико-химическим анализам, определение в полевых условиях точной глубины залегания катастрофного слоя во всех отбираемых колонках торфа становится необходимым условием для осуществления всего комплекса работ по исследованию торфа. Наблюдения в период полевых сезонов 1982 и 1983 гг. показали, что прирост дернины сфагнум фускум, а следовательно, и глубина современного залегания слоя 1908 г. во многом зависят от флуктуаций состояния климатической обстановки района и от типов болотных местообитаний, преломляющих в ту или другую сторону климатические факторы.

Согласно палеоботаническим данным [3], замерзание болот и образование торфяных бугров в междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок произошло около 1,5 тыс. лет назад. Приблизительно 250 лет назад в условиях более влажного и теплого периода начались заселение мерзлотных бугров сфагновыми мхами и трансформация долинных кустарниковых сообществ (ерников) в верховые болота, как, например, в торфяниках долин рек Маикта и Хушмо. В настоящее время активное нарастание сфагновых мхов и торфонакопление на буграх сменились частичным разрушением бугров и деградацией сфагнового покрова. В пределах Метеоритной котловины, на Северном и Чургимском торфяниках, на буграх Южного болота процессы деградации сфагнового покрова проявляются в увеличении проективного покрытия лишайников и кукушкина льна и площади мертвопокровных участков, распаде крупных рыхлых сфагновых дернин на более мелкие и плотные, появлении множества талых просадок на поверхности бугров.

На крупных мерзлотных бугристо-топьяных комплексах чистые покровы сфагнум фускум сохраняются локально, преимущественно по склонам бугров и у их основания. Одновременно распространяется и активно разрастается дернина сфагнум фускум в нетипичных для него местообитаниях. Относительно молодые покровы его почти повсеместно появились в присклоновых частях долин рек и ручьев, т. е. в местах, благоприятных для зарождения и сохранения современной вечной мерзлоты [5].

Методика ботанической датировки верхней части торфяной залежи основана на том, что в любой колонке, взятой от поверхности мохового ковра, можно выделить три горизонта: верхнюю часть моховой дернины с вертикально стоящими стебельками мха, нижнюю часть (зону разрушения), где стебельки сминаются и рвутся, и собственно торф с характерной горизонтальной слоистостью мохового волокна [1, 2, 4]. Поэтому в слоях торфяной колонки сверху вниз количество лет постепенно возрастает. Графически эта зависимость выглядит в виде кривой, переходящей в почти горизонтальную (для данного масштаба) линию на уровне собственно торфа (рис. 1). Возраст слоя в колонке определяется по линейным годичным приростам мха.

Нами проведены стационарные наблюдения за ходом развития моховой дернины сфагнум фускум в бассейне р. Кеть (Томская область). В строении головки сфагнового мха можно выделить две части (рис. 2): собственно головку, которая представляет собой сгуще-

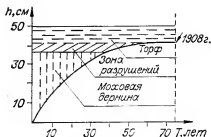


Рис. 1. Схема строения мохово-торфяной колонки и зависимость возраста слоев от глубины их залегания.

ние отклоненных под прямым углом веточек, и верхушечную почку, состоящую из собранных в розетку зачатков будущих веточек и точки роста. Весной, когда стебель трогается в рост, над бывшей поверхностью дернины выносятся лишь верхняя часть головки—почка.

Линейный рост стебля в первой половине лета идет очень интенсивно, процесс формирования склеренхимы запаздывает, поэтому отрастающий участок стебля имеет наименьший диаметр, светло-зеленоватую, а впоследствии прозрачно-буроватую окраску и редко расположенные стеблевые листья.

Во второй половине лета основной рост стебля в длину заканчивается, начинается формирование головки и закладывается новая точка роста на следующий год. Линейный рост в этот период идет крайне медленно. Стебель на этом участке утолщается, наблюдается сгущение стеблевых листьев. Хорошо развитые клетки коры придают стеблю интенсивно-бурю окраску. Весной верхушечная почка снова трогается в рост, оставляя на месте основную часть головки. Таким образом, годовой прирост стебля мха составляют светлый (весенне-летний прирост) и темный (летне-осенний прирост) участки, причем первый обычно в 2,5—3 раза больше последнего.

Для определения глубины залегания катастрофического слоя в конкретной точке отбора вырезают две колонки 10×10 см с одной общей стороной. Одна из колонок отбирается по принятой методике [1,2] и идет в дальнейшем на различные виды анализов, другая используется при датировке. Эту колонку разрезают по всей глубине на рав-

1	2	3	4	5	6	
Осень, зима	Весна	Середина лета	Вторая половина лета	Осень, зима	Весна	
Период покоя	Начало роста	Завершение линейного роста	Окончательное формирование головки	Период покоя	Начало роста	

Рис. 2. Схема линейного прироста сфагнового мха (1 — годовой линейный прирост).

ные слои толщиной 5 см и из каждого слоя выбирают 5—10 экземпляров стебельков, по которым подсчитывают число годовых приростов с точностью до полугода, а затем находят среднее число лет в слое. По этим данным строится график зависимости возраста отдельных слоев моховой дернины от глубины их залегания.

Для достаточно точной датировки подсчет годовых приростов необходимо вести до возможно более глубоких слоев, включая зону разрушения. Характер перехода моховой дернины в торф может быть различным (постепенным, резким), что зависит от ботанического состава торфа, плотности дернины, условий увлажнения и других причин. Зная особенности этого переломного момента в торфяной залежи, можно определить глубину залегания слоя с точностью до 2—3 см.

На основании 35 колонок фускум-торфа, отобранных в разных экологических условиях центра и периферии района катастрофы, выяснено, что линейный прирост сфагнум фускум зависит от типа местообитания и в разных точках отбора изменяется от 0,4—0,6 до 2,5—3 см/год, отчего слой торфа 1908 г. может залегать на глубине 27—64 см от современной поверхности. В обследованном районе выделены следующие типы местообитаний сфагнум фускум.

1. Крупнобугристые торфяники (Цветковский, Северный и др.), на которых перепад высот от талых, влажных мочажин до вершин мерзлых бугров составляет 3—7 м. Сфагнум фускум развит пятнами по поверхности бугра и его склонам. На вершине бугра мох имеет очень малый прирост — 0,6 см/год (в отдельные годы до 0,4 см/год) и может вытесняться кустистыми лишайниками. Наиболее вероятная глубина катастрофического слоя здесь 36—38 см (рис. 3, 1Б). Но отобрать такую колонку на практике трудно, так как сложно выбрать для нее место. Сфагновый покров на буграх сильно угнетен, дернина имеет прослойки лишайников и зеленых мхов, местами вообще в верхней части разрушена. Чистая, ровная дернина сфагнум фускум развивается обычно у основания бугров ближе к тальм мочажинам. Здесь, в условиях более влажных и благоприятных для развития сфагнума, моховая дернина отличается большим приростом и мощностью. Поэтому отобранные на таких участках колонки, стандартной глубиной в 45 см, не захватывают слой 1908 г. (см. рис. 3, 1А).

2. Плоскобугристые торфяники (Чамбинский, Хойский, Бублик и др.), в которых превышение бугров над мочажинами составляет не более 1—1,5 м. На них сфагновый покров нередко может занимать обширные площади, перемежаясь с лишайниками и зелеными мхами. По характеру нарастания моховой дернины этот тип местообитаний сходен с предыдущим. Имеются как зоны активного роста сфагнов, где слой 1908 г. находится на глубине 55—60 см (см. рис. 3, 2А), так и участки с малым приростом и соответственно глубиной залегания катастрофического слоя 36—43 см (см. рис. 3, 2Б).

3. Мелкобугристые мерзлые торфяники верхового типа (Макиктинский, Хушменский и др.). Это относительно старые образования, располагающиеся, как правило, в узких частях долин на более или менее крутых склонах, не заливаемых речными водами. Они также имеют явные следы угнетения и деградации сфагнового покрова и его

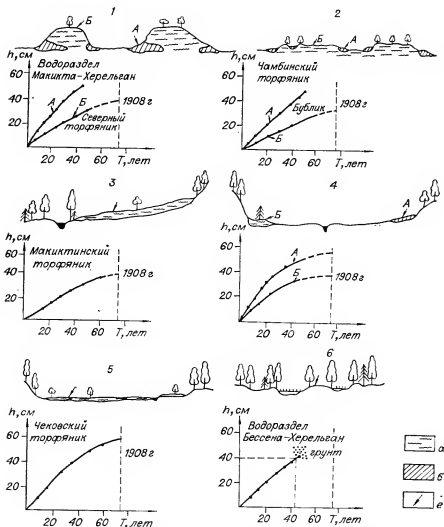


Рис. 3. Основные типы местообитаний сфагнум фускум и глубина залегания слоя 1908 г. в отобранных на них торфяных колонках.

1 — крупнобугристые торфяники; 2 — плоскоструйные торфяники; 3 — мелкобугристые верховые торфяники; 4 — прикляновое части долинных ерников; 5 — плоские верховые торфяники; 6 — молодые термокарстовые просадки и бугры пучения;  $a$  — моховая дернина и залежь фускум-торфа;  $b$  — зоны активного роста моховой дернины;  $e$  — место отбора колонок; стрелками указаны места отбора проб.

малый прирост — 0,5—0,8 см/год. Наиболее вероятная глубина залегания катастрофического слоя 37—40 см (см. рис. 3, 3).

4. Прикляновое части долинных ерников (см. рис. 3, 4). Плоские днища долин многочисленных мелких рек и ручьев в районе заняты зарослями кустарниковых березок — ерниками, а в прикляновой части в виде узкой полосы или отдельными фрагментами фор-

мируется типичный верховой комплекс со сфагнум фускум. В малых долинах временных ручьев сфагнум фускум встречается в виде отдельных кочек. Сфагновые образования такого типа — молодые и на глубине 30—60 см подстилаются другими видами торфа, обычно политриховым. Фускум-покровы в присклоновых частях долин рек и ручьев широко распространены в районе работ, и на них отбирается значительный процент торфяных колонок. Прирост моховой дернины здесь не менее 1 см/год, реже 0,8—0,9 см/год. Слой 1908 г. находится на глубине 45—53 см, т. е. на нижней границе или за пределами стандартной колонки (см. рис. 3, 4А).

Особо следует сказать о найденных в присклоновых частях долин мерзлотных образованиях. Они, как правило, небольших размеров, плоской формы и поэтому слабо заметны. Эти долинные мерзлотные поднятия имеют зеленомошно-лишайниковый покров с отдельными кочками сфагна и характеризуются невысоким его приростом. Колонки, взятые на участках мерзлотных образований, хорошо захватывают катастрофный слой (см. рис. 3, 4Б), но эти образования встречаются в районе не часто.

5. Верховые торфяники в плоских обширных депрессиях рельефа (торфяники на водоразделе Кимчу — Чеко, на правом берегу нижнего течения руч. Чеко и др.). Это прогрессивно развивающиеся болота с плоской поверхностью, большой площадью водосбора и малым стоком из-за небольшого уклона. Сфагновый покров на них развит хорошо, годовой прирост мхов от 0,7 до 1 см/год. Слой 1908 г. датируется повсеместно на площади торфяника на глубине от 40 до 65 см (см. рис. 3, 5) при мощности пласта фускум-торфа 70—100 см.

6. Молодые термокарстовые просадки и бугры пучения на водоразделах и плоских склонах. Они представляют собой начальные стадии формирования крупнобугристых торфяников и в районе встречаются значительно реже других типов местообитаний сфагнум фускум. Дернина его развивается отдельными пятнами и кочками и подстилается обычно непосредственно минеральным грунтом. Даже при мощности 40—43 см дернина не содержит катастрофного слоя, поскольку она появилась спустя 15—20 лет после падения метеорита (см. рис. 3, 6).

На основании всех датированных в течение 1982—1983 гг. колонок торфа получены следующие данные. В 50% колонок фускум-торфа катастрофный слой залегает на глубине до 40 см, в 26% — на глубине от 40 до 50 см и в 24% — глубже 50 см. При этом независимо от мощности моховой дернины в каждой конкретной точке отбора слой 1908 г. находится в самом верхнем горизонте собственно торфа. Поэтому если колонка наряду с моховой дерниной и зоной ее разрушения включает и небольшой пласт торфа, то она, как правило, содержит катастрофный слой. Обобщенные типы местообитаний сфагнум фускум позволяют ориентироваться на глубину залегания в них слоя 1908 г. Тем не менее при отборе проб торфа для поиска метеоритного вещества целесообразно в каждом случае уточнять эту величину, измеряя линейные приросты непосредственно в полевых условиях.

1. Львов Ю. А. О нахождении космического вещества в торфе.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Выд. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 140—144.
2. Львов Ю. А. Методика отбора и обработки торфа для выделения мелко-дисперсной минеральной фракции.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 90—93.
3. Львов Ю. А., Бляхарчук Т. А. Мерзлотный торфяник в центре области выпадения вещества Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 84—99.
4. Мультияров Е. Я., Лапшина Е. Д. Датировка верхних слоев в торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 75—84.
5. Шумилова Л. В. О бугристых торфяниках в южной части Туруханского края.— Изв. Томск. отд-ния Русского ботанич. о-ва, Томск, 1931, т. 3, вып. 1-2, с. 1—18.

С. П. ГОЛЕНЕЦКИЙ, А. П. ВОЛОШИН,  
Е. Ф. КОВНАЦКИЙ, Ю. А. ЛЬВОВ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПЛАНШЕТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ПОТОКОВ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

Определение атмосферных потоков микроэлементов (МЭ) методически весьма сложно, особенно при обследовании обширных территорий. При использовании в качестве планшета снега возникают трудности с предварительной обработкой, консервацией и транспортировкой талой воды, определением соотношений растворимой и нерастворимой частей МЭ, потерь за счет сорбции на взвешях, стенках сосудов, фильтрах, а результаты отражают только структуру выпадения в зимний период. Искусственные планшеты (кювет-сборники) обеспечивают наблюдение в течение всего года, но требуют оборудования специальных наблюдательных площадок для продолжительных экспозиций. Кроме того, их геометрия, тип собирающей поверхности и другие условия сбора осадков и сухих испарений неадекватны естественным земным покровам. С этих позиций оправдан поиск других природных планшетов, аккумулирующих аэрозоли.

В районе взрыва Тунгусского метеорита в зольном веществе верхового торфа, бывшего в момент катастрофы поверхностью болотного покрова и удержавшего осевшее из атмосферы распыленное космическое вещество, выявилось высокое содержание МЭ, входящих в группу так называемых «летучих», обычных в составе глобальных аэрозольных осадков [10, 11]. Было высказано предположение [5, 6] о преобладающей роли атмосферных выпадений в формировании микроэлементного состава смежных с атмосферой природных сред, в том числе растительного покрова. В связи с этим возник ряд вопросов,

три из которых относятся к нашей теме. Каково происхождение «летучих» МЭ, поступающих в биогеоценоотическую оболочку Земли? Каковы пути и механизмы потребления их растениями? Какова возможность использования разных типов растительного покрова в качестве планшетов для оценки атмосферных потоков МЭ?

Основными источниками МЭ в растениях традиционно считается почва, в почве — почвообразующие породы, в океане — продукты водной эрозии дна и берегов, речной сток и подводный вулканизм, в аэрозолях — продукты вулканизма и ветровой эрозии почв и горных пород. Между тем относительные содержания и пропорции МЭ во всех перечисленных средах существенно отличаются между собой. Так, по сравнению с основными и ультраосновными породами земной коры почвы заметно (на один-два порядка) богаче такими, преимущественно «летучими», МЭ, как сера, калий, хром, марганец, медь, цинк, мышьяк, селен, бром, молибден, рубидий, серебро, кадмий, индий, олово, сурьма, иод, теллур, цезий, золото, ртуть, свинец, висмут и др. Наземные растения по сравнению с почвами содержат этих элементов уже на несколько порядков больше [5]. Максимально богаты ими воды океана и глобальные аэрозоли. Коэффициенты обогащения (КО) их серой, селеном, бромом, иодом, сурьмой, теллуrom, ртутью и некоторыми другими МЭ достигают значений  $10^3$ — $10^6$ . Ни один из принципиально возможных механизмов элементного фракционирования не может объяснить столь существенных различий в микроэлементных составах смежных и взаимопроникающих природных сред.

Ключ к пониманию этого вопроса дает рассмотрение КО различных природных сред, особенно смежных, и коэффициентов корреляций (КК) их КО основными «летучими» МЭ (медью, мышьяком, селеном, бромом, кадмием, оловом, сурьмой, цезием, золотом, свинцом) (рис. 1). Обращает на себя внимание высокая корреляция в звеньях глобальные аэрозоли — высшие растения (КК = 0,87) и высшие растения — мхи (КК = 0,85). Мхи отличаются от сосудистых растений отсутствием корневого питания. Тем не менее микроэлементные составы тех и других хорошо коррелируют между собой (КК = 0,86) и плохо — с почвой (КК = 0,38), что заставляет усомниться в приоритетности корневого питания растений «летучими» МЭ и считать глобальные аэрозоли одним из основных источников МЭ в растениях.

Далее, несмотря на близкие микроэлементные составы, почвы заметно богаче теми же МЭ по сравнению со средним составом земной коры (КК = 0,28 и 0,1 соответственно), а последние — по сравнению с ультраосновными породами (КК = 0,021), так или иначе отражающими состав изверженного вещества, контакт которого с атмосферными выпадениями на протяжении всей геологической истории Земли был, вероятнее всего, минимальным. В целом КО рассмотренных сред закономерно уменьшаются в ряду глобальные аэрозоли — воды океана — мхи — сосудистые растения — почвы — земная кора — изверженные породы. В той же последовательности уменьшается и степень прямого контакта рассмотренных сред с атмосферой, что косвенно указывает на ее важную роль в формировании

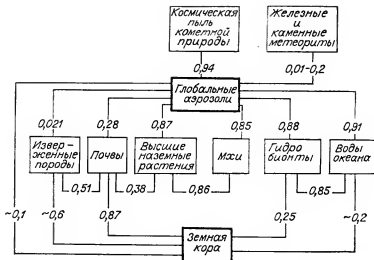


Рис. 1. Схема связей и соответствующие коэффициенты корреляции коэффициентов обогащения смежных природных сред «летучими» микроэлементами.

микроэлементного состава всех внешних геосфер, особенно океана и биосферы.

Источником атмосферных МЭ может быть как земное, так и космическое вещество [4]. Среди земных источников высокие КО имеют лишь воды океана и летучие продукты вулканизма. Если бы глобальные аэрозоли генерировались поверхностью океана, его водяной пылью, то они должны были бы отражать состав океанической воды и по макроэлементам. Однако КО ими (в частности, серой, хлором и магнием) обеих сред отличаются на три — пять порядков. Поэтому морскую пыль нельзя рассматривать в качестве основного источника МЭ в глобальных аэрозолях. Поступление в атмосферу тех же МЭ с летучими продуктами вулканизма на один-два порядка ниже их потоков из атмосферы. Кроме того, изотопный состав свинца в продуктах вулканизма отличается от рассеянного свинца и ближе к свинцу рудному [15]. И то и другое свидетельствует против решающей роли этого источника в формировании микроэлементного состава глобальных аэрозолей.

По происхождению космическая пыль может быть продуктом абляции метеоритов, сгорания метеороидов, межпланетной пылью преимущественно кометной природы. По величине КО только последняя близка к глобальным аэрозолям ( $KK = 0,94$ ). Кроме того, по изотопному составу кометный свинец, по данным анализа вещества Тунгусского метеорита [15], весьма близок к рассеянному свинцу, в частности из илов Тихого океана. То и другое вместе указывают на прямую связь глобальных аэрозолей с поступающей на Землю космической пылью кометной природы.

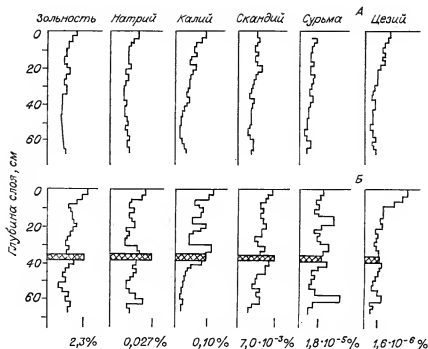


Растительный покров аккумулирует значительную часть оседающей пыли [13]. Однако наряду с механической задержкой аэрозолей листьями растений весьма вероятен внекорневой (аэральный) тип питания их многими жизненно важными МЭ, особенно «летучими» [4]. В литературе имеются хотя и многочисленные, но лишь частные сведения, подкрепляющие это положение для отдельных МЭ. Так, до 45% потребности растений в двуокиси серы удовлетворяется за счет поглощения ее листьями из воздуха [25]. Иод в начале вегетации поступает в растения преимущественно из почвы, но в конце вегетации — из воздуха [20]. В листьях яблонь [22] содержание свинца выше, чем в плодах, что также указывает на преимущественно атмосферный источник этого элемента. Убедительны опыты внекорневой подкормки растений некоторыми МЭ [14 и др.]. Искусственное усиление притока глобальной компоненты атмосферных МЭ существенно стимулирует рост и развитие многих сельскохозяйственных культур [7, 8, 9].

Скорость обмена между растениями и средой зависит от ряда причин: от разности концентраций каждого МЭ на границе раздела, подвижности его носителей, площади контакта с рассматриваемой средой и вовлекаемой в обмен массы последней. По сравнению с почвой даже корневая система растений заметно богаче указанными выше «летучими» МЭ, еще больше содержат их ветви и листья. Рассмотрим полученные нами усредненные данные по соотношению коэффициентов обогащения\* микроэлементами листьев ( $KO_{\text{л}}$ ) и ветвей ( $KO_{\text{в}}$ ) ряда деревьев и кустарников. Это соотношение составляет для меди 1,2; для цинка — 1,6; для мышьяка — 1,6; для селена — 1,4; для брома — 3,7; для рубидия — 2,7; для стронция — 2,3; для иттрия — 1,6; для циркония — 0,71; для ниобия — 0,79; для молибдена — 1,8. Видно, что листья значительно богаче такими МЭ, как цинк, мышьяк, селен, иттрий, молибден, бром, рубидий и стронций. Таким образом, потоки «летучих» МЭ направлены преимущественно из атмосферы через листья, стебли и корни в почву, а не наоборот.

Подвижность носителей МЭ в почве (ионы и комплексы почвенных растворов) на порядки ниже, чем в атмосфере (аэрозольные частицы). Поверхность надземной части большинства растений, за исключением обитателей аридных зон, в полной фазе развития значительно превосходит рабочую поверхность корневой системы. Вовлекаемый в обмен объем окружающей среды для надземной части растений также несравненно больше, чем для корневой системы, в силу высокой подвижности воздушных масс и самих аэрозольных частиц, значительная доля которых водорастворима. Кроме того, запасы МЭ в прикорневом слое почвы ограничены, а содержание аэрозольных частиц в атмосфере непрерывно пополняется за счет каменных (эоловые взвеси, морская, вулканическая пыль и др.), так и неземных (космическая пыль) источников. Приведенные соображе-

\*  $KO = \frac{(C_x/C_{Fe})_{\text{ср.}}}{(C_x/C_{Fe})_{\text{з.к.}}}$ , где  $C_x$  и  $C_{Fe}$  — концентрации исследуемого (x) элемента и железа (Fe) в данной среде (ср.) и земной коре (з. к.).



ния объясняют основную особенность микроэлементного состава растений — хорошую корреляцию коэффициентов обогащения жизненно важных МЭ с глобальными аэрозолями ( $r = 0,87$ ) и плохую — с почвами ( $r = 0,23$ ) [5—7]. При этом отпадает необходимость в привлечении сложных, порой спорных механизмов элементного фракционирования, возникновения элементостатических барьеров и т. п.

Хорошая корреляция микроэлементных составов растений и аэрозолей позволяет использовать растения для оценки состава и интенсивности потоков атмосферных МЭ на земную поверхность. Существенное значение в способности растения аккумулировать аэрозоли имеет его жизненная форма. Наиболее подробно исследованы в этом аспекте олиготрофные сфагновые мхи [4, 9, 15].

Сфагновые мхи верховых выпуклых болот, особенно в зоне вечной мерзлоты, полностью изолированы от почвенных пород и их вод и получают водно-минеральное питание только из атмосферы. Структура поверхности моховой дернины определяет преимущественно седиментационный механизм поступления в нее аэрозольных частиц. Влагоемкость и сорбционная способность сфагнов исключительно велики, благодаря чему сумма годовых атмосферных выпадений концентрируется в зоне прироста этого года, лишь слабо мигрируя в другие годовые слои. Сфагновая толща сравнительно хорошо стратифицируется и датируется [2, 18], по крайней мере в пределах

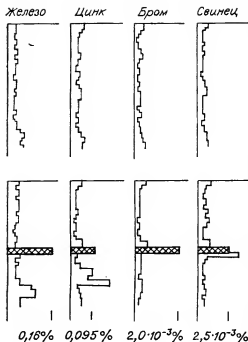


Рис. 2. Распределение некоторых химических элементов по глубине залегания сфагновых мхов на верхних болотах междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок.

А — типичная фоновая колонка, Б — колонка из района падения Тунгусского метеорита 1908 г. (заштрихован «катастрофический» слой мха).

50—100 лет, что позволяет получать весьма полную информацию о многолетней динамике поступления атмосферных МЭ [16].

Методика отбора образцов мха и их предварительной обработки достаточно полно изложена в ряде работ [10, 16]. Элементный анализ воздушно-сухих образцов или их зольных остатков производится обычно ядерно-физическими методами (рентген-флюоресцентный, нейтронно-или гамма-активацион-

ный анализы). Зола можно также анализировать методами оптической спектроскопии в дуговом разряде в полном катоде, а после его растворения — в искровом разряде или в индуктивно связанной плазме.

На рис. 2 приведены результаты послойного элементного анализа отложений сфагна бурого (*Sphagnum fuscum*) с двух однотипных болот из бассейна Подкаменной Тунгуски, одно из которых в 1908 г. оказалось в эпицентре взрыва Тунгусского метеорита. На рисунке видно, что МЭ выпавшего вещества Тунгусского метеорита, особенно такие, как железо, цинк, бром, молибден, свинец, скандий, сосредоточены преимущественно в «катастрофическом» слое торфа. Вторая серия образцов не имеет подобных аномалий и является типично фоновой, так как обе точки отбора проб удалены от ближайших источников техногенных эмиссий более чем на 500 км.

В обеих колонках в свежем приросте мха выявляется некоторое увеличение содержания биологически значимых МЭ: калия, натрия, цинка, частично перемещенных, видимо, из отмирающих частей мха. Другие МЭ, в основном с низкими коэффициентами обогащения (железо, кобальт и др.), распределены сравнительно равномерно по всей толще моховой дернины. Таким образом, повышенное содержание первой группы МЭ в живой части мха может быть следствием естественных процессов и не связано с ростом фоновых антропогенных выпадений. Это дает основание не согласиться с выводами относительно роста глобального фона выпадений свинца [1] и ртути [26], сде-

## Коэффициенты обогащения минеральной составляющей сфагновых мхов из различных районов СССР

Элемент	Коэффициент обогащения				Элемент	Коэффициент обогащения			
	Ханты-Мансийский нац. округ	Омская область	Томская область	Красноярский край		Ханты-Мансийский нац. округ	Омская область	Томская область	Красноярский край
K	2,2	1,6	2,8	2,0	Br	250	290	260	290
Mn	8,0	8,4	11	7,6	Rb	0,88	0,65	0,92	0,80
Cu	7,0	6,2	10	6,8	Sr	1,0	1,1	0,90	1,3
Zn	48	43	63	46	Pb	60	65	70	50
As	330	310	280	240					

ланными на основании послойного анализа торфа верховых болот.

Для оценки пространственных характеристик состава атмосферных выпадений МЭ нами был выполнен элементный анализ дернины сфагна бурого на значительной территории СССР в полосе 60—65° с. ш. (табл. 1). Из приведенных данных следует, что минеральные составляющие моховых отложений (соответственно и атмосферных выпадений) практически не отличаются по соотношениям МЭ, несмотря на их различную удаленность от промышленных центров (300—1000 км). Этот результат можно рассматривать, с одной стороны, как подтверждение локального типа миграций техногенных загрязнителей атмосферы, распространяющихся, по данным многих авторов, на 10—15 км, а с другой — как свидетельство единства природы глобальных аэрозолей.

По группе проб сфагна бурого

Таблица 2

Скорости поступления некоторых микроэлементов из атмосферы на земную поверхность

Элемент	Скорость притока, мг/м²·год		
	Моновые пробы	Поверхность оз. Байкал [3]	Балансные оценки [18]
Cr	—	0,42	0,58
Co	—	0,12	0,23
Zn	8,9	1,0	12
Br	0,14	0,70	—
Sb	0,015	0,026	0,17
Au	0,0010	—	—
Hg	0,028	0,020	0,060
Pb	0,18	—	2,0
Сумма минеральной составляющей	600	—	—

из бассейна Подкаменной Тунгуски, взятых с площади отбора 0,04 м² и толщины пласта в 10 см, что соответствует сроку нарастания мха в период 1930—1980 гг. [21], были рассчитаны скорости притока некоторых атмосферных МЭ. Они в целом удовлетворительно согласуются с оценками годовых потоков МЭ на поверхность оз. Байкал [3] и с балансными оценками глобального вывода тех же МЭ из атмосферы [17] (табл. 2).

В отличие от мхов травянистые растения не стратифицируются и могут быть использованы для оценки потоков атмосферных МЭ только за вегетационный период одного года (3—5 мес). Однако такие план-

шеты распространены повсеместно, а получаемые с их помощью данные могут иметь практическое значение, например при оценке промышленных загрязнений, учета состояния угодий в сельском хозяйстве и т. д. Осаждение аэрозолей на поверхность травянистых растений во многом определяется размерами частиц и их природой, но зависит также от вида растений и структуры травостоя [23]. Известно [19], что захват и удержание аэрозолей металлов листьями в большой мере связаны с положением листьев и типом их поверхности, увеличиваясь в несколько раз для листьев с шероховатой или ворсистой поверхностью. Поэтому в качестве планшетов целесообразно использовать луговое разнотравье. Варьирование результатов по причине видовых особенностей растений становится в этом случае минимальным.

Предварительные результаты определения содержания МЭ в луговом разнотравье (10 видов растений) фонового района Калужской области совпадают по порядку величин как с расчетными данными по выносу этих же МЭ с урожаем пшеницы [21], так и с данными по годовому захвату их травянистой растительностью юга лесной зоны [12] (табл. 3). Сравнение данных табл. 2, 3 показывает, что усредненные атмосферные потоки и скорости накопления в травяных планшетах большинства МЭ в пересчете на единицу площади весьма близки (табл. 4). Учитывая разницу в способе получения использованных данных, расхождение в 2—3 раза можно признать удовлетворительным. Таким образом, для оценки потока атмосферных МЭ кроме олиготрофных мхов может быть использовано луговое разнотравье, даже для производства фоновых измерений. Однако более перспективен этот метод для контроля атмосферных потоков техногенных МЭ в промышленных районах.

Травяные планшеты были использованы нами для подобных работ в окрестностях одного из техногенных источников. В табл. 5 полученные результаты приведены в сравнении с условно-нормативными содержаниями тех же МЭ в травянистых растениях луговых и настоящих степей [12]. Видно, что фоновый состав травяных план-

Таблица 3

Содержание некоторых микроэлементов в травянистых растениях нечерноземной зоны СССР

Элементы	Содержание, кг/км <sup>2</sup>			Элементы	Содержание, кг/км <sup>2</sup>		
	Данные авторов	Согласно [21]	Согласно [12]		Данные авторов	Согласно [21]	Согласно [12]
Cr	—	0,040	0,32	Rb	6,7	—	0,90
Mn	90	—	43	Sr	4,4	—	7,2
Fe	53	—	—	Y	0,090	—	0,14
Co	—	0,030	0,18	Zr	0,80	—	1,4
Ni	—	—	0,36	Mo	—	—	0,11
Cu	—	—	1,8	Sb	—	0,0060	0,0009
Zn	5,5	10	9,0	Au	—	0,0008	—
As	0,033	—	0,027	Hg	—	0,00п	0,0026
Br	4,1	0,14	0,72	Pb	0,37	—	0,45

Таблица 4

Атмосферные потоки некоторых микроэлементов и скорости их накопления в травяных планшетах на основе лугового разнотравья, кг/км<sup>2</sup>-год

Элемент	Поток	Скорость накопления	Элемент	Поток	Скорость накопления
Cr	0,50	0,54	Sb	0,020	0,012
Co	0,18	0,36	Au	0,0010	0,0024
Zn	10	24	Hg	0,024	0,0078
Br	0,42	1,3	Pb	1,1	1,2

шетов в целом соответствует условно-нормативным данным. Техногенная нагрузка на растения определяется в основном приоритетными техногенными МЭ — цинком и свинцом и в 16 и 9,4 раза превышает фоновую. Атмосферные потоки железа, меди, мышьяка и иттрия соответственно лишь в 1,3; 1,5; 2,1; 2,0 раза выше фоновых. Избыточные потоки железа, рубидия и стронция связаны, вероятно, с более высокой общей запыленностью городского воздуха. Присутствие в атмосфере других МЭ может быть обусловлено технологическими особенностями производства и составом сырья.

Пробы травяных планшетов отбирают на участках целинных почв с плотным растительным покровом, расположенных не ближе

Таблица 5

Микроэлементный состав растительных планшетов (степное разнотравье) (кг/км<sup>2</sup>) и атмосферные потоки техногенных микроэлементов вокруг промышленного центра (кг/км<sup>2</sup>-год)

Элемент	Расстояние от источника, км				Годовой захват растениями [10]		Атмосферные потоки МЭ*
	0,8—3,0	5,0—8,0	12—15	100	луговых степей	сухих степей	
Mn	18	20	20	28	240	48	—
Fe	82	57	50	35	—	—	140
Cu	19	11	10	7,5	10	2	34
Zn	84	24	10	5,0	50	10	240
As	0,37	0,20	0,16	0,12	0,15	0,03	0,75
Se	0,10	0,09	0,07	0,08	0,05	0,01	0,06
Br	13	13	6,2	6,0	4,0	0,8	18
Rb	7,9	6,5	4,8	4,4	5,0	1,0	10
Sr	30	23	25	22	40	8,0	20
Y	3,0	1,5	1,3	0,80	0,7	0,15	6,0
Nb	1,6	1,5	1,3	0,80	—	—	2,4
Mo	1,0	0,80	0,58	0,60	0,60	0,12	1,2
Pb	31	5,4	3,2	2,7	2,5	0,5	85

\* Вблизи источника (0,8—3,0 км) за вычетом фона (12—100 км) для вегетационного периода 4 мес.

100 м от леса, не затопляемых паводками и не используемых под выпас. Фиксируют сроки отбора проб и начала вегетации в данной местности. На площадке  $1 \text{ м}^2$  срезают всю надземную фитомассу, взвешивают на месте, тщательно перемешивают и отбирают аликвоту весом 200 г. Пробы упаковывают в фильтровальную бумагу, что обеспечивает их досушивание при транспортировке. Сухую фитомассу или ее золу исследуют любым методом многоэлементного анализа. Пересчет содержания МЭ на единицу площади производят с учетом массы всей пробы, величины аликвоты и анализируемой массы образца, влагосодержания или зольности материала. Следует избегать проб с окультуренных почв, поскольку минеральный состав таких растений может быть искажен за счет применения удобрений.

Листва деревьев также концентрирует аэрозоли [13, 19, 24]. Однако в отличие от травостоя кроны деревьев существенно отличаются аэродинамическими характеристиками. Если в травостое преобладает седиментационный механизм аккумуляции аэрозолей, а динамический захват сказывается лишь в приземном слое воздуха, то в кронах деревьев последний механизм является, видимо, основным. Поглощение аэрозолей в кронах (особенно единичных деревьев) при обдувании их воздушными потоками происходит в слое 10—25 м. Динамический захват аэрозолей кронами одиночных деревьев может более чем на порядок превышать седиментационный. В глубине леса захват аэрозолей обоими путями, видимо, сопоставим, так как горизонтальные потоки воздуха обдувают здесь только вершины деревьев.

Несмотря на то что сухое осаждение атмосферных аэрозолей на сложные структуры земной поверхности (лесные массивы) плохо поддается математическому моделированию [24], отдельные деревья или редкий древостой могут быть с успехом использованы для картирования атмосферных загрязнений, особенно вблизи источников техногенных эмиссий. При выяснении содержания свинца, цинка и железа в листьях тополя в окрестностях того же техногенного источника хорошо выявились закономерный спад уровня содержания свинца и цинка при удалении от источника (рис. 3) и отсутствие спада для железа как нетехногенного элемента. Пик загрязнений на расстоянии

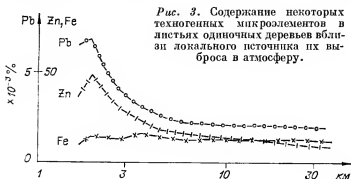


Рис. 3. Содержание некоторых техногенных микроэлементов в листьях одиночных деревьев вблизи локального источника их выброса в атмосферу.

1,5—2 км от источника отвечает зоне приземления факела выброса мелкодисперсных аэрозолей при обычных метеоусловиях.

При использовании листьев деревьев контрастность техногенной аномалии получается ниже, чем в случае травостоя. Связано это с тем, что деревья богаче естественными цинком и свинцом, чем травы, по-видимому, за счет лучшего извлечения кроной мелкодисперсных аэрозолей и большего вклада грубодисперсных золых взвесей в формирование микроэлементного состава травяного покрова.

Приведенные данные позволяют предполагать, что в составе глобальных аэрозолей высока доля МЭ внеземного происхождения, в частности кометного. Аэрозольным путем, видимо, осуществляется значительная часть питания растений жизненно важными МЭ. Косвенным подтверждением этому служит относительно высокая продуктивность растительного покрова в олиготрофных местообитаниях — на верховых болотах, положительных элементах рельефа боровых песчаных равнин и пр. Роль космической подкормки через аэрозоли существенна, очевидно, не только для естественной растительности, но и для агроценозов. Эти вопросы, несомненно, требуют внимательного исследования в связи с их большим теоретическим и прикладным значением.

С другой стороны, способность растений аккумулировать и усваивать сухие и влажные аэрозоли позволяет рассматривать растительный покров как удобный в практическом использовании природный планшет для оценки потоков аэрозолей как индустриального, так и природного происхождения, в том числе фоновых. К настоящему времени более или менее широко применяется для этой цели дернина сфагновых мхов, в основном сфагна бурого [1, 26 и др.]. Привлечение для тех же целей других типов растительного покрова требует серьезных методических исследований, в которых важно оценить и классифицировать не только типы поверхности листьев растений, но и положение их в пространстве биогеоценоза, формы приспособлений к увеличению динамического захвата аэрозолей. В целом приведенные в статье первые опыты использования растительных планшетов позволяют предполагать их широкие возможности при мониторинге загрязнения атмосферы и самих растений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баденкова С. В., Добродеев О. П., Сухова Т. Г. Распределение свинца в разрезе верховых торфяников как показатель загрязнения атмосферы. — Вест. МГУ. Сер. 5, География, 1982, № 3, с. 53—58.
2. Бляхарчук П. А. Расчет накопления торфа верховых болот. — Материалы научно-практической конференции «Молодые ученые и специалисты — народному хозяйству». Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983, с. 4—5.
3. Ветров В. А., Пословин А. Л. Определение потока микроэлементов из атмосферы на водную поверхность с применением нейтронно-активационного анализа. — В кн.: Проблемы экологического мониторинга. Т. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1980, с. 51—56.



4. Выпадение космического вещества на поверхность Земли/Иванова Г. М., Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1975.— 120 с.
5. Голенецкий С. П. Кометное вещество в окружающей среде.— В кн.: Мониторинг фонового загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеонадат, 1982, с. 61—74.
6. Голенецкий С. П., Жигаловская Т. Н., Голенецкая С. И. К вопросу о роли атмосферных выпадений в формировании микроэлементного состава почв и растений.— Почвоведение, 1981, № 3, с. 40—48.
7. Голенецкий С. П., Малахов С. Г., Степанов В. В. Пути формирования микроэлементного состава природных сред. (Пристендовая брошюра ВДНХ).— Обнинск: Гидрометеонадат, 1983.— 7 с.
8. Голенецкий С. П., Мурашов Д. А., Степанов В. В. Роль космической пыли в микроэлементном балансе почва — растительность.— В кн.: Вопросы оптимизации растительного покрова Верхневолжья. Калинин: Изд-во Калининск. ун-та, 1981, с. 77—89.
9. Голенецкий С. П., Степанов В. В. Кометное вещество на Земле.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 99—122.
10. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Колесников Е. М. Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 г.— Геохимия, 1977, № 11, с. 1635—1644.
11. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Колесников Е. М., Мурашов Д. А. К вопросу о химическом составе и природе Тунгусского космического тела.— Астроном. вестник, 1977, т. 11, № 3, с. 126—136.
12. Добровольский В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние.— М.: Мысль, 1983.— 272 с.
13. Ковач М., Опауски И., Клиничек П., Подани Я. Листья деревьев как индикаторы загрязнения тяжелыми металлами крупных городов.— В кн.: Комплексные проблемы мониторинга загрязнения окружающей природной среды. Л.: Гидрометеонадат, 1982, с. 307—314.
14. Колесник Л. В. Влияние внекорневой подкормки винограда марганцем на его урожай и некоторые физиологические процессы.— В кн.: Микроэлементы в сельском хозяйстве и медицине. Киев: Наукова думка, 1966, с. 111—116.
15. Колесников Е. М., Шестаков Г. И. Изотопный состав свинца из торфов района Тунгусского взрыва 1908 г.— Геохимия, 1979, № 8, с. 1202—1211.
16. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Иванова Г. М. Метод исследования динамики выпадения промышленной пыли на больших площадях.— Гигиена и санитария, 1974, № 8, с. 97—98.
17. Микроэлементы в атмосфере фоновых районов суши и океана/Остромильский А. Х., Анохин Ю. А., Ветров В. А. и др.— Обнинск: изд. ВЕИГМИ, 1981.— 42 с.
18. Мульдьяров Е. Я., Лапина Е. Д. Датировка верхних слоев торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 75—84.

19. Парибок Т. А., Сазыкина Н. А., Тамп Г. А. и др. Содержание металлов в листьях деревьев в городе.— Ботан. журн., 1982, т. 67, № 11, с. 1533—1539.
20. Тихомиров Ф. А. Количественные показатели миграции иода в системе атмосфера — почва — природные воды — растения.— В кн.: Тезисы докладов 6-го Делегатского съезда ВОП. Кн. 2. Тбилиси, 1981, с. 115—116.
21. Химический состав пищевых продуктов/Под ред. Нестерина Н. Ф., Скурихина И. М.— М.: Пищевая промышленность, 1979.— 247 с.
22. Bumbalova A., Havranek E., Harangozo M. Determination of Mn, Fe, Ni, Cu, Zn and Pb contents in samples of apple trees by radionuclide X-ray fluorescence analysis.— Radiochem. and Radioanal. Lett., 1982, v. 54, N 6, p. 367—376.
23. Davidson C. I., Miller J. M., Preskov M. A. The influence of surface structure on predicted particle dry deposition to natural grass canopies.— Water, Air, and Spil. Pollut., 1982, v. 18, N 1—3, p. 25—43.
24. Höfken K. D., Gravenhorst G. Deposition of atmospheric aerosol particles to beek — and spruce forest.— Deposit. Atmos. Pollut. Proc. Colloq. Oberursel — Taunus., 9—11 Nov., 1981.— Dordrecht. c. a., 1982, p. 191—194.
25. Kiyoura R. Sulphur dioxide should be considered as sulphur source necessary for preservation of life and vitality.— Chem., Economy and Engineering [Rev., 1982, v. 14, N 3 (156), p. 23—30.
26. Pfeiffer M. P. Peatbog records of atmospheric mercury deposition.— Nature, 1981, v. 293, N 5828, p. 127—130.

М. Н. ЦЫНБАЛ, В. Э. ШНИТКЕ

## ГАЗОВОЗДУШНАЯ МОДЕЛЬ ВЗРЫВА ТУНГУССКОЙ КОМЕТЫ

Из-за противоречий в гипотезах, объясняющих Тунгусское явление как взрыв крупного метеорита [20, 30, 31], аннигиляцию анти-вещества с газами атмосферы [39], ядерный взрыв [17], снежный ком [25] и других, к 70-м годам большинство исследователей приняли предположение о его кометной природе [10, 33, 41, 42]. Однако, хотя кометная модель и объясняет наибольшее число фактов, ряд вопросов в истолковании происшедших на местности и в атмосфере эффектов до сих пор остается без ответа.

Наиболее важный момент в создании теории явления в целом — это разъяснение механизма высотного взрыва космического тела. В качестве рабочей гипотезы сторонники кометной модели чаще все-

го использовали механизм «теплого взрыва», предложенный К. П. Станюковичем и В. П. Шалимовым для небольших комет, представляющих собой конгломерат из метаноаммиачных льдов с вкраплением каменных глыб и пыли [30, 31]. Но этот механизм вызывает ряд серьезных возражений. Так, например, А. В. Золотов отмечает, что при пологой траектории полета тела, принятой многими исследователями, отсутствие полосового вывала указывает на незначительную мощность баллистической волны и, следовательно, малую скорость, а в этом случае взрыв такой мощности только за счет кинетической энергии тела невозможен [16].

Но часть замечаний исследователей к кометной гипотезе, по нашему мнению, снимется, если предположить, что основным источником энергии взрыва были реакции с кислородом воздуха большого количества газообразных веществ, возникших при испарении замерзших газов кометного ядра.

Подобные соображения высказывались еще в 60-х годах. Так, К. Коуэн с соавторами отмечали, что если для метеоров с высокой скоростью относительный вклад химической энергии в суммарную энергию взрыва будет небольшим, то для тел с низкой скоростью он должен быть значительным. По их мнению, подобный взрыв космического тела мог бы объяснить многие из наблюдавшихся явлений, но ограниченность знаний о действительной концентрации радикалов в кометном веществе, их природе и механизме реакций сильно затрудняет количественный подсчет освобождения энергии в такой модели [39].

Ю. А. Львов, анализируя обогащение углерода органического вещества торфа изотопом  $^{13}\text{C}$ , также приходит к выводу о том, что в общей энергии, выделившейся при разрушении космического тела, наряду с кинетической энергией определенную часть составила химическая энергия горения [23].

Модель высотного взрыва Тунгусского космического тела, учитывающая и его кинетическую энергию и химическое взаимодействие кометного вещества с кислородом воздуха, предложена М. Н. Цынбалом в виде объемного взрыва [35]. Подобные взрывы происходят в случае образования облака смеси воздуха с газообразными, жидкими или твердыми (в виде порошковой взвеси) веществами с достаточно высокой теплотой сгорания. В определенных условиях, зависящих в первую очередь от концентрации веществ в воздухе, а также от ряда физико-химических свойств, сложных газодинамических процессов перемешивания и горения, в таком облаке может возникнуть детонационный процесс в виде взрыва, вызывающего значительные разрушения. Детонация облака может инициироваться химическим взаимодействием, ударной волной, фотохимическим или тепловым импульсом, а также электрическим разрядом. Аналогичный механизм имеет место при случайных взрывах в угольных шахтах, на предприятиях химической промышленности и мукомольных производствах.

Процесс взрывчатого превращения (детонации) газовых смесей в принципе не отличается от детонации конденсированных взрывча-

тых веществ (ВВ): в обоих случаях взаимодействие протекает в результате сжатия при прохождении ударной волны по веществу или смеси веществ, способных по своим физико-химическим свойствам поддерживать параметры ударной волны. Скорость детонации и выделяющаяся на единицу объема энергия при взрыве газовых смесей меньше, чем у конденсированных ВВ, вследствие меньшей концентрации потенциальной энергии. Давление продуктов детонации конденсированных ВВ достигает  $2 \cdot 10^4$  МПа и более, а у газовых смесей не превышает нескольких мегапаскалей. Но длительность затухания избыточного давления внутри и вне облака детонирующей газовой смеси значительно больше, чем при взрыве конденсированных ВВ, а по величине тепловыделения при детонации, отнесенной к единице массы, углеводороды, например метан, значительно превосходят конденсированные ВВ. Взрывчатое превращение 1 кг тротила при нормальных условиях сопровождается выделением энергии около  $4,2 \cdot 10^6$  Дж, а при взрыве 1 кг метана в смеси с достаточным количеством воздуха выделение энергии составляет  $50,3 \cdot 10^6$  Дж.

Эта особенность взрывчатого превращения газовых смесей привлекла внимание зарубежных специалистов по вооружению. По сообщениям иностранной прессы, обобщенным в обзоре [13], в 1969—1971 гг. в США были созданы штатные боеприпасы объемного взрыва, в которых в качестве боевого заряда использовались жидкие углеводородные топлива, находящиеся при нормальном или повышенном давлении, в том числе окись этилена, метан и др. Объемно-детонирующие боеприпасы и получили за рубежом название «вакуумной бомбы».

Возможен ли взрыв комы кометы, попавшей в плотные слои атмосферы Земли, по механизму, подобному авариям в угольных шахтах или взрыву «вакуумной бомбы», и как подобная модель согласуется с реальной картиной Тунгусской катастрофы?

Д. А. Андриенко и В. Н. Ващенко приводят обобщенный по результатам ряда исследователей состав кометного ядра: 40% составляют лед и замерзшие газы  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$ , 30% — очень активные соединения типа  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2\text{H}_4$ ,  $\text{NH}_2\text{OH}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{C}_2\text{N}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и др., а остальные 30% приходятся на инертные труднолетучие вещества — силикаты, окислы металлов, углеродную пыль и метеоритное вещество [2].

Ядра «старых» комет типа Понс — Виннеке и Энке — Баклунда, многократно проходивших перигелий и подвергавшихся интенсивному воздействию солнечной радиации, вероятно, содержат полимер циан — парацян, цианамид, ацетонитрил, а по некоторым исследованиям, они могут содержать и такие вещества, как метиловый спирт, нитрилацетилен ( $\text{HC} \equiv \text{C} - \text{CN}$ ), динитрилацетилен ( $\text{NC} - \text{C} \equiv \text{C} - \text{CN}$ ) и др. [14].

Физические и термодинамические свойства некоторых вероятных веществ ядер комет приведены в табл. 1. Необходимо подчеркнуть, что температуры кипения, указанные обычно в справочниках, определены при давлении 1 атм, но на высоте в несколько километров эти величины существенно меньше. Отметим также, что, как видно из

Физические и термодинамические свойства некоторых вероятных веществ кометных ядер [32, 34]

Вещество	Плотность при нормальном давлении, кг/м <sup>3</sup>			Температура, °C		Энтальпия образования газа, кДж/моль
	жидкости	газа	газовой смеси*	плавления	кипения	
H <sub>2</sub>	81 **	0,090	0,933	-259,1	-252,6	0
H <sub>2</sub> O	917 **	0,804	—	0	100,0	242,2
CO <sub>2</sub>	1512 **	1,977	—	-78,5***	—	395,9
CS <sub>2</sub>	1263	3,400	1,425	46,2	-111,9	-115,1
NH <sub>3</sub>	681	0,771	1,226	-77,7	-33,4	44,4
CH <sub>4</sub>	415	0,716	1,239	-182,5	-161,6	77,1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	570	1,260	1,291	-169,2	-103,7	-63,3
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	463	1,179	1,284	-80,8	-83,6	-243,4
CO	341	1,250	1,280	-205,2	-191,5	110,6
CH <sub>3</sub> O	915	1,339	1,301	-92,0	-19,2	116,1
CH <sub>3</sub> OH	810	1,428	1,309	-97,2	64,5	201,5
HCN	688	1,205	1,280	-13,3	25,7	-106,0
CH <sub>3</sub> CN	783	1,830	1,331	-44,9	81,6	Нет данных
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	957	2,320	1,389	-27,8	-21,1	-288,3

\* Плотность смеси газа с воздухом, в которой газ и кислород воздуха находятся в стехиометрическом соотношении.

\*\* Плотность твердого вещества.

\*\*\* Температура сублимации.

табл. 1, некоторые соединения, предположительно присутствующие в ядрах комет, являются экзотермическими, т. е. распадаются с выделением тепла. Такие вещества в смесях с воздухом особенно склонны к горению и взрывчатому превращению, к тому же они характеризуются широкими концентрационными пределами взрываемости.

Ряд исследователей предполагает, что не только газовая фаза комы, но и ядра комет могут содержать свободные радикалы типа CH, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CN и др. Если такие радикалы действительно существуют в свободном состоянии, взаимодействие их с кислородом воздуха должно происходить еще энергичнее и сопровождаться значительно большим выделением энергии, чем при окислении соответствующих веществ. Так, например, при окислении 1 т метана выделяется энергия  $5,03 \cdot 10^{10}$  Дж, ацетилена —  $4,91 \cdot 10^{10}$  Дж, а радикала метина (CH) —  $8,55 \cdot 10^{10}$  Дж; при окислении 1 т циана —  $2,08 \cdot 10^{10}$  Дж, а радикала CN —  $2,97 \cdot 10^{10}$  Дж; при окислении 1 т аммиака —  $1,87 \cdot 10^{10}$  Дж, а радикала NH<sub>2</sub><sup>+</sup> —  $7,67 \cdot 10^{10}$  Дж.

Как уже отмечалось, вещества, обнаруженные при изучении спектров комет, в газообразном состоянии образуют с воздухом смеси, способные к взрывчатому превращению. На основании термодинамических свойств возможных компонентов газового облака можно рассчитать массу веществ, необходимую для выделения при объемном взрыве энергии, соответствующей принятой для Тунгусского взрыва —  $10^{17}$  Дж ( $10^{24}$  эрг), и размеры предполагаемого космического

Таблица 2

Масса и объем некоторых вероятных кометных веществ и их стехиометрических смесей с воздухом, необходимых для выделения при взрыве энергии  $10^{17}$  Дж [29, 32, 34]

Вещество	Удельное выделение энергии, Дж/г $\cdot 10^{-10}$		Масса, т $\cdot 10^{-6}$		Объем облака газовой смеси*, км <sup>3</sup>	Диаметр приведенного к сфере объема вещества, км	
	при сгорании в кислороде	при сгорании в воздухе	газа	газовоздушной смеси		в конденсированном состоянии	газовоздушной смеси*
H <sub>2</sub>	12,11	0,348	0,83	28,7	30,8	0,27	3,90
CH <sub>4</sub>	1,42	0,219	7,05	45,7	32,1	0,22	3,94
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5,03	0,274	1,98	36,5	29,5	0,21	3,84
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	4,74	0,299	2,11	33,4	25,9	0,19	3,67
CO	4,91	0,334	2,04	30,0	23,3	0,19	3,54
CH <sub>3</sub> OH	1,02	0,293	9,82	34,2	26,7	0,39	3,70
CH <sub>3</sub> CHO	1,74	0,332	5,75	30,1	23,2	0,23	3,54
HCN	2,02	0,268	4,95	37,3	28,5	0,23	3,80
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	1,92	0,258	5,22	38,7	30,3	0,24	3,87
CH <sub>3</sub> CN	3,05	0,296	3,28	33,8	25,4	0,20	3,65
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	2,08	0,328	4,81	30,5	21,9	0,21	3,50
NH <sub>3</sub>	1,86	0,261	5,36	38,3	31,3	0,25	3,91
CO + H <sub>2</sub> O **	0,51	0,146	19,64	44,0	36,5	0,43	4,12
CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O **	2,51	0,137	3,96	38,5	31,5	0,24	3,92
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O **	1,04	0,164	9,62	35,3	26,7	0,27	3,71

\* Размеры облака при нормальном атмосферном давлении.

\*\* Соотношение масс веществ в смеси 1:1.

тела. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Поскольку состав газовой смеси и соотношение ингредиентов точно не известны, расчет произведен для стехиометрической смеси кислорода воздуха с каждым из веществ. Для сравнения в табл. 2 показано, как изменится размер ядра кометы в том случае, если оно будет состоять из горючих веществ только на 50%.

Как видно из табл. 2, масса замерзших газов ядра кометы, выделившей при объемном взрыве энергию  $10^{17}$  Дж, должна находиться в пределах  $10^6$ — $10^7$  т, что соответствует массам реально существующих небольших комет [36].

Геометрические размеры ядра гипотетической кометы также получаются соответствующими реально существующим короткопериодическим кометам [36] и для всех рассмотренных в табл. 2 веществ лежат в интервале 0,2—0,4 км, что совпадает с существующими оценками размеров Тунгусского метеорита.

Для возникновения взрывоопасной ситуации космическое тело при торможении в атмосфере должно было разрушиться и в результате интенсивного испарения образовать облако газовой смеси.

## Взрывчатые характеристики газов головы кометы в смеси с воздухом

Вещество	Концентрационные пределы взрываемости в смеси с воздухом, %		Температура, °C			Скорость детонации, км/с	Давление в детонационной волне, МПа	$\Delta P$ на расстоянии 20 км от границы облака, МПа
			воспламенения в воздухе	продуктов взрыва	в волне детонации			
	нижний	верхний						
H <sub>2</sub>	4	74,2	470—500	2700	3050	2,09	1,77	0,020
CH <sub>4</sub>	5	15	538	2540	3000	2,30	2,66	0,020
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3	34	540	2950	3340	1,95	2,21	0,020
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,5	81	335	3330	3750	2,04	2,37	0,019
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	6	32	Нет данных	3370	3800	2,03	2,47	0,017
CS <sub>2</sub>	1,2	50	236	2570	2930	1,71	1,83	0,020
CO	12,5	74,2	660—700	3170	3550	1,80	2,12	0,020
CO + H <sub>2</sub> O *	—	—	—	2570	3150	1,58	1,45	0,042
CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O *	—	—	—	2350	2950	1,84	1,75	0,007
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O *	—	—	—	2570	3190	1,90	1,97	0,011

\* Соотношение масс веществ в смеси 1:1.

Величину такого облака рассчитывали из условия образования стехиометрической смеси горючего газа с кислородом воздуха (см. табл. 2). Трудно учесть некоторое увеличение размеров облака, вызванное тем, что давление воздуха на предполагаемой высоте взрыва (5—8 км) ниже нормального, а при интенсивном испарении газов давление внутри облака должно было стать больше, чем окружающее.

Следует ожидать, что в реальном облаке смешение газов с воздухом неравномерно: внешние слои обеднены горючими компонентами, а внутренние — воздухом. Такая неравномерность смешения газов должна была привести к некоторому увеличению времени взаимодействия, интенсивному догоранию и «подпитыванию» ударной волны, что эквивалентно возрастанию энергии взрывных газов на 10—20% [27].

Зная термодинамические свойства вероятных веществ, образующихся при испарении замерзших газов ядра кометы, можно рассчитать параметры взрыва смеси этих веществ. В табл. 3 приведены известные концентрационные пределы взрываемости и температуры самовоспламенения смесей с воздухом [22, 26, 34], а также результаты расчета основных характеристик взрыва.

Закономерности детонационного процесса газовых смесей пока изучены недостаточно, и для оценочных расчетов, результаты которых приведены в табл. 3, мы использовали зависимость, установленные для конденсированных ВВ, полагая, что в основном они справедливы и для смесей газов.

Температуру продуктов взрыва (т. е. максимальную температуру, до которой нагреваются продукты взрывчатого превращения

смеси за счет выделяющегося при взрыве тепла) рассчитывали методом последовательных приближений как отношение теплового эффекта реакции к суммарной теплоемкости продуктов сгорания при заданной температуре.

Температура детонации, при которой происходит взрывчатое превращение во фронте детонационной волны, превышает температуру продуктов взрыва в  $\frac{2k}{k+1}$  раз, где  $k$  — показатель адиабаты в уравнении состояния газа при взрыве.

Скорость детонации (т. е. скорость распространения детонационной волны в газовой смеси) определяли по формуле [27]

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1) \cdot U_1},$$

где  $D$  — скорость детонации;  $k$  — показатель адиабаты;  $U_1$  — удельное выделение энергии при сгорании газовой смеси.

Давление в детонационной волне находили по формуле [27]

$$P_{\text{дет}} = 2(k - 1) \cdot \rho_{\text{см}} \cdot U_1,$$

где  $P_{\text{дет}}$  — давление в детонационной волне;  $\rho_{\text{см}}$  — плотность газовой смеси.

Величину скачка давления во фронте ударной волны на расстоянии 20 км от границы облака (т. е. примерно в 22 км от его геометрического центра) рассчитывали по формуле Садовского [27]:

$$\Delta P_{\phi} = 6,86 \cdot 10^5 \frac{U_1}{U_T} \cdot \frac{q}{R^3} + 2,65 \cdot 10^5 \left( \frac{U_1}{U_T} \right)^{2/3} \times \\ \times \frac{q^{2/3}}{R^2} + 8,24 \cdot 10^4 \left( \frac{U_1}{U_T} \right)^{1/3} \cdot \frac{q^{1/3}}{R},$$

где  $\Delta P_{\phi}$  — скачок давления во фронте ударной волны;  $U_1$  — удельное выделение энергии при взрыве данной газовой смеси;  $U_T$  — выделения энергии при взрыве 1 кг тротила —  $4,2 \cdot 10^6$  Дж [27];  $q$  — масса газовой смеси;  $R$  — расстояние от границы облака.

Как видно из табл. 2, 3, значительная часть веществ, определяемых в головах комет, способна образовывать с воздухом достаточно эффективные взрывчатые смеси, удельная энергия взрыва которых составляет 75—90% удельной энергии взрыва тротила, а температура воспламенения явно ниже температур, развивающихся на поверхности космического тела при аэродинамическом нагреве.

Поскольку естественно предположить, что газовое облако, образовавшееся при испарении кометного ядра, состоит не только из склонных к взрывчатому превращению веществ, в табл. 3 приведены для сравнения расчетные взрывчатые характеристики для трех случаев разбавления горючего компонента инертным по отношению к кислороду воздуха веществом (водой). Как видно из результатов расчетов, если в образовавшемся газовой смеси инертные



вещества составляют даже 50%, взрыв еще возможен, хотя основные его характеристики (температура, скорость распространения и давление в детонационной волне) заметно снижаются.

В составе ядра кометы могли находиться аммиак и другие гидриды азота. Вследствие небольшого удельного тепловыделения аммиачно-воздушные смеси обычно взрываются только под давлением [29], но в смеси с другими горючими газами, в волне детонации или при воздействии ударной волны они способны к взрывчатому превращению и при нормальном давлении.

Влияние паров воды на горение и взрыв газозооных смесей различно в зависимости от их состава. В случае углеводородных смесей обычно несколько возрастает температура воспламенения; для водород-воздушных смесей эффект не однозначен: известны случаи как повышения, так и понижения температуры воспламенения; при окислении оксида углерода в присутствии паров воды или водорода реакция резко ускоряется, а температура воспламенения снижается в результате их каталитического действия.

Так же должны были проявить каталитическую активность в реакциях окисления металлы группы платины и редкоземельные элементы, предположительно присутствовавшие в составе космического тела, — их повышенное содержание установлено в районе катастрофы в слоях торфа, относящихся к 1908 г. [1, 9], и в близких по времени слоях антарктического льда [40].

Для оценки предлагаемой модели взрыва нет необходимости производить сложные расчеты многокомпонентной газовой смеси, так как взрывчатые характеристики смеси отдельных ингредиентов с воздухом довольно близки. Наиболее вероятная температура в волне детонации 3000—3400°C, скорость детонации — 1,7—1,9 км/с, а давление в детонационной волне — 1,5—2,5 МПа. Скачок давления во фронте ударной волны на расстоянии 20 км от границы облака должен составить 0,01—0,02 МПа.

Разогрев и торможение рыхлого ядра кометы на последнем участке траектории полета неминуемо должны были привести к его дроблению и интенсивному испарению с образованием огромного аэрозольного облака газов в смеси с воздухом.

Как видно из табл. 2, для того чтобы энергия взрыва была не менее  $10^{17}$  Дж, к заключительному участку траектории в голове кометы все еще должно было оставаться не менее  $5 \cdot 10^6$  т замерзших газов. На их испарение требовалось затратить значительное количество энергии. Для проверки энергетической возможности испарения всей массы замерзших газов необходимо оценить запас кинетической энергии тела, а для этого надо задать его скорость перед моментом дробления и испарения.

Вопрос о скорости тела на заключительном участке полета неоднократно обсуждался, но единого мнения пока не достигнуто. Так, например, А. В. Золотов, исходя из отсутствия полосового вывала леса вдоль траектории, полагает, что баллистическая волна, образовавшаяся при пролете тела, была незначительной, а следовательно, скорость его не могла превышать 2 км/с [16]. Это утверждение

справедливо для случая малого угла наклона траектории ( $5-17^\circ$ ), предложенного Е. Л. Криновым [20], но ряд исследователей считает траекторию более крутой, и тогда это ограничение скорости снимается.

Ф. Ю. Зигель утверждает, что скорость тела не могла быть менее 2 км/с, так как при меньшей скорости не возникает свечения болида [15]. Для ледяной кометы это ограничение также снимается, поскольку в данном случае свечение связано не столько с ионизацией, сколько с реакцией горения газов, для воспламенения которых достаточно разогрева поверхности лишь до  $400-500^\circ\text{C}$  (см. табл. 3).

Верхний предел скорости Тунгусского космического тела можно оценить из условия его прочности. Известно, что крупные метеориты разрушаются на высоте 30—60 км над поверхностью Земли под влиянием напряжений, возникающих при аэродинамическом торможении, причем аэродинамическое давление в момент дробления иногда на порядок меньше, чем предел прочности каменных пород или даже железа. Предполагают, что дробление связано с неоднородностью строения метеорных тел и происходит по границам их структурных элементов [5]. По-видимому, это явление будет иметь место и в случае ледяного ядра с вкраплением силикатных и металлических частиц; в таком теле неизбежно возникновение внутренних напряжений, связанных со значительным различием коэффициентов теплопроводности и теплового расширения льда, силикатов и металлов.

Справочные данные о прочности твердой фазы замерзших газов, составляющих ядра комет, практически отсутствуют. Сопротивление раздавливанию у льда составляет 2,5 МПа [19], а у твердой углекислоты — около 5 МПа (определено авторами экспериментально для монолитных образцов сечением  $30 \times 40$  мм).

При скорости метеорного тела 10 км/с на высоте 10 км (при аэродинамическом коэффициенте сопротивления  $C_x = 1$ ) аэродинамическое давление составит около 20 МПа, что значительно превышает прочность льда. Давление встречного потока воздуха на этой высоте уменьшится до 2 МПа лишь при снижении скорости тела до 3 км/с, но при такой же скорости на высоте, например, 6 км оно уже превышает 3 МПа.

Таким образом, если Тунгусское космическое тело было небольшой кометой, ядро которой представляло собой замерзшие газы и лед с вкраплением силикатов, то из условия его механической прочности следует, что на заключительном участке траектории полета оно не могло иметь скорость более 2—3 км/с. Если же допустить, что на высоте 6 км его скорость превышала 5 км/с, то придется отказаться от предположения о его рыхлой ледяной структуре, поскольку в этом случае оно должно было выдержать аэродинамическое давление более 8 МПа.

В табл. 4 приведены результаты расчета запаса кинетической энергии тела при скоростях 2 и 1 км/с и количества тепловой энергии, необходимой для полного испарения замерзших газов и льда с образованием газозвдушного облака [3]. Как видно из приведенных результатов расчетов, при скорости тела на конечном участке тра-

Удельная теплота испарения и кинетическая энергия различных газов

Вещество	Масса газа, необходимая для выделения при взрыве энергии $10^{11}$ Дж, т·10 <sup>-6</sup>	Удельная теплота испарения, $\frac{\text{Дж}}{\text{г}}$ ·10 <sup>-10</sup>	Тепловая энергия, необходимая для испарения, Дж·10 <sup>-15</sup>	Кинетическая энергия тела, Дж·10 <sup>-15</sup>	
				при скорости 1 км/с	при скорости 2 км/с
H <sub>2</sub>	0,83	4,52	0,37	0,41	1,65
CH <sub>4</sub>	1,93	5,04	1,00	0,99	3,98
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,41	6,90	1,46	1,05	4,22
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,04	4,82	0,98	1,02	4,08
CO	9,82	2,12	2,08	4,91	19,64
NH <sub>3</sub>	5,36	13,70	7,30	2,66	10,70
CO + H <sub>2</sub> O *	19,64	—	22,27	9,82	39,30
CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O *	3,98	—	5,52	2,00	8,00
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O *	9,62	—	10,87	4,81	19,24

\* Соотношение масс веществ в смеси 1:1.

ектории 2 км/с запаса его кинетической энергии уже достаточно для полного испарения при резком торможении.

Интенсивное испарение и смешение с воздухом должны были несколько снизить температуру газозвушной смеси, что обусловило задержку взрыва и создало возможность для лучшего перемешивания горючих компонентов с воздухом. Детонация газозвушной смеси могла произойти как вследствие быстрого сгорания газообразного вещества, рассеянного телом вдоль траектории полета, так и при воздействии баллистической волны. Поскольку движение метеорных тел сопровождается электризацией их поверхности, то детонация могла быть вызвана и электрическим разрядом. Вполне вероятно, что к моменту первичного взрыва еще не вся масса замерзших газов кометного ядра перешла в газообразное состояние, и взрыв вызвал дополнительное дробление и испарение еще конденсированной части вещества и инициировал последующий взрыв или взрывы, если их было несколько.

К настоящему времени собран довольно большой фактический материал об эффектах, которые прямо или косвенно произведены взрывом Тунгусского космического тела. Рассмотрим, какие особенности предлагаемой модели взрыва должны были проявиться на местности и в атмосфере.

Падение крупных каменных или железных метеоритов обычно сопровождается образованием дымного следа, состоящего, очевидно, из мелкодисперсных продуктов окисления их поверхности. Известно, например, что при падении Сихотэ-Алинского метеорита темный дымный след продержался в течение нескольких часов. Очевидно, наблюдавшие полет Тунгусского метеорита, либо вообще не отмечают образования следа, либо сообщают о слабой туманной полосе [37]. Именно такой след и должен был образоваться при испарении

и сгорании замерзших газов, составляющих ядра комет: после охлаждения продуктов сгорания в конденсированном состоянии будет находиться только вода. Наблюдавшие полет, как правило, не отмечают и какой-либо яркой цветовой гаммы пламени, окружавшего пролетавшее тело, что также характерно для горения газов, не содержащих в большом количестве примеси конденсированных веществ.

Особенности объемного взрыва должны были сказаться и на характере повреждения деревьев, ожога растительности и лесного пожара. Вероятнее всего, ожоговые повреждения на большей части площади были вызваны не световой вспышкой, поскольку при химических взрывах доля выделяющейся световой энергии незначительна, и не излучением во фронте ударной волны, поскольку оно кратковременно и температура во фронте ударной волны быстро падает с расстоянием, а тепловым потоком, который несли продукты взрывчатого превращения и который «подпитывался» энергией за счет догорания продуктов, не окислившихся в процессе детонации. А поскольку скорость ударной волны значительно больше скорости распространения взрывных газов, следует ожидать, что термическому ожогу деревьев должен предшествовать их излом. И действительно, именно такую последовательность событий отмечал Л. А. Кулик [21]. При ядерном же взрыве, когда около  $1/3$  энергии выделяется в виде световой вспышки, лучистый ожог должен был предшествовать излому под действием ударной волны.

Характер взрыва неминуемо должен был сказаться и на специфических повреждениях молодых концов ветвей хвойных деревьев. При лучистом ожоге (например, при ядерном взрыве) ожоговые повреждения на всей площади должны быть ориентированы на источник лучистого ожога, чего на самом деле не произошло [28].

При объемном взрыве подобные повреждения должны возникнуть как результат термического поражения камбиального слоя при воздействии теплового потока продуктов взрыва, причем их расположение по окружности ветки зависит в основном от состояния коры. Камбий пострадает в местах, где кора по каким-то причинам утончена или нарушена (например, лопнула или ободралась при прохождении ударной волны). Появление повреждений, которые ориентированы в пространстве на область высотного взрыва, в принципе возможно и при данной модели, но лишь в зоне, непосредственно примыкающей к центральной части вывала леса, где температура во фронте ударной волны, видимо, была еще недостаточно высока и, несмотря на кратковременность воздействия, обеспечила необходимую для ожога плотность теплового потока.

Из аномальных особенностей лесного пожара остановимся лишь на одной, не нашедшей пока объяснения в рамках предложенных ранее моделей взрыва: возникновении первичного очага на хр. Хладного (12 — 14 км на юг от эпицентра ожога, рассчитанного С. А. Разиным [28]). Пожар, распространявшийся из центра, был остановлен р. Хушмо и не перешел на ее южный берег, а тепловой поток оказался слишком слабым, чтобы вызвать новые очаги пожара южнее р. Хушмо (ведь именно здесь проходит граница области распростра-

нения существенных следов ожога ветвей лиственниц). Поэтому появление первичного очага пожара в 6 км южнее этой границы представляет особый интерес.

Исходя из гипотезы объемного взрыва газовой воздушной облака, образовавшегося при испарении ядра кометы, возникновение пожара на хр. Хладного, а возможно, и «мозаичность» всей картины лесного пожара можно объяснить тем, что, как уже отмечалось, к моменту основного взрыва, происшедшего над Южным болотом, еще не вся масса космического тела успела испариться и взрывной волной на значительной площади были разбросаны куски конденсированной части вещества, которые, догорая на Земле при благоприятных условиях, привели к возникновению локальных очагов пожара.

Важное значение для проверки любой гипотезы о механизме взрыва имеет обоснование формы области вывала леса. Для упрощения расчетов параметров ударной волны, образующейся при взрыве газовой смеси, мы приняли сферическую форму облака. Однако в реальных условиях за время от момента образования облака до взрыва его форма должна была трансформироваться и приблизиться скорее всего к эллиптическому параболоиду. Известно, что продукты взрыва разлетаются перпендикулярно поверхности заряда, несколько отклоняясь в сторону, противоположную месту инициирования взрыва [23]. Вследствие этого контур области вывала приобретет вид параболы, что не противоречит картине, наблюдаемой на местности.

Значительный интерес представляет вопрос о совпадении проекции траектории полета тела с осью симметрии вывала. Для его решения рассмотрим в упрощенном виде процессы, происходившие с телом при вхождении в атмосферу Земли.

Ядро кометы начало прогреваться с поверхности, что неминуемо привело к значительному увеличению вокруг него газового облака. Можно предположить, что в начальный период этот процесс тормозился находящейся на поверхности ядра пылевой матрицей, своего рода теплозащитным экраном, образовавшимся при подтаивании и «загрязнении» поверхности за время многократных прохождений перигелия. Однако, как показали эксперименты Е. А. Каймакова и В. И. Шаркова с искусственными ядрами комет, эта матрица может периодически разрушаться и сбрасываться с поверхности ядра [36]. Если разогрев космического тела резко увеличится, а это должно происходить при торможении в более плотных слоях стратосферы, то разрушение и сброс матрицы должны носить характер взрыва или серии взрывов. И действительно, наблюдатели описывают пролет Тунгусского космического тела как «сноп искр», «огненный шар, превратившийся при приближении к горизонту в огненный столб», «небо как бы раскрылось, и „дыхнул“ огонь ярче солнца» и т. п. и на всем протяжении полета отмечают сильные звуковые эффекты [20, 37].

Аэродинамический нагрев должен был вызвать активное испарение вещества с поверхности ядра, выброс из-под тугоплавкого экран-матрицы струй пара, создающих некоторую реактивную тягу,

сброс части экрана с наиболее прогретых участков. Все это должно было привести к постоянному изменению аэродинамических характеристик тела и относительного расположения центров сопротивления и массы, а следовательно, к какому-то непредсказуемому «рысканию», движению по небаллистической траектории с переменным азимутом и высотой, особенно на заключительном участке.

Учитывая сказанное, в рамках гипотезы объемного взрыва ядра кометы не следует обязательно ожидать совпадения направлений начального и конечного участков траектории и связывать с ними ось симметрии области поражений на местности. И не стоит вводить для объяснения «маневров» Тунгусского космического тела представление о «зондах ВЦ, находящихся в Солнечной системе», как это сделано в работе [15].

Отметим также, что космическое тело могло начать дробиться задолго до приближения к междуречью Хушмо — Кимчу, и над Южным болотом вполне мог взорваться лишь один из его фрагментов, который, в свою очередь, мог способствовать интенсивному испарению уцелевших кусков замерзших газов и возникновению «вторичного», более слабого взрыва или взрывов. Во всяком случае, предлагаемая модель легко объясняет множественность взрывов, отмеченную многими очевидцами, чего не смогли сделать предложенные ранее гипотезы.

Большой интерес представляет вопрос о возможных эффектах от выброса в верхние слои атмосферы мелкодисперсных и газообразных продуктов взрыва. Напомним о двух отдаленных аналогах.

В 1883 г. при взрыве вулкана Кракатау в атмосферу было выброшено около  $19 \text{ км}^3$  вулканического пепла и других продуктов извержения, выпавших в смежных районах на площади свыше  $800 \text{ тыс. км}^2$ . Повышенная концентрация пепла в воздухе на высоте до 80 км, вызвавшая интенсивные зори, отмечалась в течение нескольких лет. Было определено, что около  $1/3$  выброшенного материала упало в радиусе до 50 км,  $1/3$  — в радиусе 3000 км, а оставшая часть оставалась в воздухе в течение почти 3 лет [38].

При строительстве взрывом первой очереди противоселевой плотины в урочище Медео, в районе г. Алма-Аты в 1966 г. был взорван заряд из 3700 т тротила (т. е. энергия взрыва составила около  $1,5 \cdot 10^{13}$  Дж). При этом образовались газы, содержащие более 1000 т окиси углерода и более 100 т синильной кислоты. При соприкосновении с атмосферным воздухом эти газы загорелись и их температура резко повысилась, в результате чего они расширились и стремительно поднялись вверх, прорезав слой облаков и достигнув высоты 8 км [27].

При взрыве Тунгусского космического тела кратковременное выделение тепла и образование области разрежения вследствие выгорания кислорода и конденсации части продуктов взрыва должны были вызвать мощнейшие восходящие потоки воздуха, которые вынесли в атмосферу на высоту не менее 50 км продукты окисления. Вследствие неравномерности смешения газов в облаке часть углеводородов, по-видимому, окислилась не полностью, причем одним из

продуктов неполного окисления был углерод в мелкодисперсном состоянии. Рассчитать массу выделившегося при взрыве углерода невозможно, так как не поддается оценке степень смешения испарившихся продуктов с воздухом, однако количество его значительно, и показать это можно на следующем примере. Если замерзшие газы ядра кометы в основном состояли из метана и при взрыве не полностью окислилось лишь 10% его массы, то должно было образоваться около 150 тыс. т мелкодисперсного углерода. Учитывая высоту взрыва и размеры газовой воздушной облака, можно предположить, что около 2/3 этого количества было выброшено в атмосферу, а 50 тыс. т прибито взрывной волной к Земле.

Расчет, приведенный для данного примера, является сугубо ориентировочным, поскольку все исходные данные в значительной степени неопределенны, однако можно с уверенностью сказать, что при объемном взрыве углеродсодержащих веществ кометного происхождения выпадение значительных количеств мелкодисперсного углерода обязательно. Это отнюдь не означает, что в торфяной колонке, отобранной для поиска космического вещества, в слое 1908 г. должен быть сажевый горизонт. Химическая активность аморфного углерода значительно выше, чем у графита, при нагревании на воздухе он воспламеняется при 300—500°C, а продуктами горения являются  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  [34]. Так что на участках, где в 1908 г. был пожар, следы его вряд ли сохранились, а на тех болотах, где пожара не было, он должен был усвоиться растительностью и привести к сдвигу в изотопном составе углерода торфа.

Исследования на местности подтверждают, что в районе катастрофы имеются пункты, где в 1908 г. осело на почву значительное количество углерода возрастом более 60 тыс. лет. Так, например, пробы из торфяника Бублик (6 км северо-западнее эпицентра, за горой Кларк) показали довольно большое содержание «древнего» углерода [18, 23]. Сделанная Е. М. Колесниковым оценка количества космического углерода, который должен был рассеяться в районе взрыва [18], даже несколько превышает значение, приведенное в нашем примере.

Относительно небольшое содержание в торфе района катастрофы силикатных или металлических частиц, по-видимому, можно объяснить тем, что частицы, находившиеся при взрыве в центральной (высокотемпературной) части детонирующего облака, разложились, а находившиеся на периферии, в зоне более низких температур, расплавились или раздробились до мелкодисперсного состояния и, как при вулканическом извержении или ядерном взрыве, будучи выброшены в мезосферу, выпадали глобально по всей поверхности Земли в течение нескольких лет. Именно этим Р. Ганапати объясняет повышенное содержание иридия в отложениях антарктического льда, относящихся к 1908—1918 гг. [40].

Значительный интерес представляет связь Тунгусского взрыва с аномальными атмосферными явлениями конца июня — начала июля 1908 г. Как уже отмечалось, при взрыве образовалось не менее 150 тыс. т мелкодисперсного углерода, кроме того, значительная

часть силикатных и металлических вкраплений ядра кометы также была переведена в мелкодисперсное состояние. Расчеты, произведенные по формуле, предложенной Г. И. Покровским для разреженной атмосферы [27], показывают, что для газовой смеси, приведенных в табл. 2, давление во фронте ударной волны на расстоянии 80 км от границы облака составляло не менее 1 кПа, т. е. было достаточным для дальнейшего распространения продуктов взрыва, «доставки» их в область образования серебристых облаков. Этот вывод подтверждается и оценкой Е. Л. Кринова, считавшего, что высота столба продуктов взрыва была не менее 80 км, иначе он не мог бы наблюдаться в ряде пунктов Восточной Сибири [20].

Запыление мезосферы, вызванное как вторжением в атмосферу Земли потока космической пыли, предшествовавшего столкновению с кометой (и, по-видимому, связанного с ее орбитой), так и выбросом значительного количества продуктов взрыва, хорошо объясняет наблюдавшиеся сумеречные аномалии. Но одной запыленности недостаточно для появления столь небывалых по масштабам и одновременности развития серебристых облаков.

Для образования серебристых облаков необходимо соблюдение, как минимум, двух условий: парциальное давление водяного пара в атмосфере должно превосходить упругость насыщенного пара над льдом при данной температуре, и в этой области атмосферы должно быть достаточное количество ядер конденсации, в роли которых могут выступать метеорные частицы, космическая пыль, мелкодисперсные частицы, занесенные из нижних слоев атмосферы. Эти два условия не всегда совпадают по времени, и, возможно, поэтому после извержения вулкана Кракатау 27 августа 1883 г. впервые серебристые облака наблюдали лишь 10—13 июня 1885 г., хотя аномальные зоревые явления были отмечены уже через день после извержения [24]. Не отмечалось серебристых облаков и в период прохождения Земли через хвост кометы Галлея 19—20 мая 1910 г., и после извержения вулкана Катмай 6 июня 1912 г. Эти три события по срокам не совпали с периодом наиболее низких температур в мезопаузе, когда с понижением температуры резко падает упругость насыщенного пара и создаются условия для конденсации водяного пара в кристаллики льда [6].

В отличие от приведенных примеров момент Тунгусского взрыва почти совпал с периодом июльского максимума появления серебристых облаков, приходящегося на первую декаду июля. Но, учитывая уникальность явления (столь мощного их развития не наблюдалось ни до, ни после 1908 г.), мы считаем, что дело не только в удачном совпадении запыленности атмосферы с периодом сезонного понижения температуры в мезопаузе. По-видимому, существенный вклад в образование серебристых облаков внесли пары воды, содержащиеся в продуктах взрыва: значительное ее количество должно было образоваться при взрыве углеводородов, не считая воду, входящую в состав кометного ядра. Так, например, при взрыве газовоздушного облака, содержащего  $2 \cdot 10^6$  т метана, должно было выделиться  $4,5 \cdot 10^6$  т воды, значительная часть которой вместе с другими продук-



тами взрыва была выброшена в мезосферу и сыграла большую роль в формировании аномальных атмосферных явлений.

В последние годы большое внимание уделяется вызванному Тунгусским взрывом временному нарушению озоносферы и его последствиям. При этом рассматривается следующий механизм явления: вследствие значительного повышения температуры воздуха за фронтом ударной волны пролетавшего космического тела произошла диссоциация молекул атмосферного азота и кислорода: при последующем охлаждении воздуха кроме обратной рекомбинации в  $N_2$  и  $O_2$  образовался оксид азота, причем в значительном количестве, которое оценивают от нескольких до десятков миллионов тонн. Безусловно, такое количество NO, активно связывающего озон, должно было существенно сказаться на общем содержании  $O_3$  в атмосфере и состоянии озоносферы.

Не оспаривая данного механизма и его значения в глобальных атмосферных процессах 1908—1910 гг., заметим, что непосредственно в районе катастрофы его роль, по-видимому, была не слишком велика. Ведь основная масса оксида азота была образована в атмосфере вдоль траектории полета тела и вне зоны тонкого слоя с максимальной концентрацией озона. Под воздействием воздушных потоков образовавшийся оксид азота смещался (скорее всего в западном направлении), постепенно связывая озон, имеющийся на высотах до 50 км, и опускаясь в нижние слои атмосферы под влиянием нисходящих потоков. Локальное «окно» в озоносфере, вероятно, образовалось в области пересечения траектории полета со слоем максимальной концентрации озона, т. е. примерно в 25—30 км от эпицентра при угле наклона траектории на заключительном участке полета  $40^\circ$ , и в 75—95 км при угле наклона  $15^\circ$ . Однако пока нет данных, подтверждающих нарушение озонового слоя над этими районами, — здесь не зафиксированы ни морфологические аномалии у растений и муравьев, ни усиление термолуминесценции горных пород, отмечаемые в центре района катастрофы [7, 8].

В рамках рассматриваемой гипотезы объемного взрыва механизм повреждения озонового слоя может быть представлен иначе. Существенное воздействие на озоносферу должны были оказать два фактора: значительное повышение температуры воздуха в волне детонации (превышающее  $3000^\circ C$ ), которое должно было вызвать диссоциацию молекул  $O_2$  и  $N_2$  с последующим образованием оксида азота, и выделение при взрыве ряда продуктов, активно вступающих в реакцию с озоном. В первую очередь к ним относятся продукты неполного окисления углеводородов, циана и других азотсодержащих веществ ядра кометы — оксиды углерода и азота, водород.

Значительная часть взрывных газов и оксида азота, образовавшегося в волне детонации взрыва, была поднята на высоту до 80 км и, проходя тонкий озоновый слой, выжгла в нем «окно», через которое в район катастрофы в течение какого-то времени проникала обычно задерживаемая озоном солнечная радиация с длиной волны до  $2900 \text{ \AA}$ , весьма активная в биологическом отношении. Этим, по-ви-

димому, и объясняются обнаруженные на участках, примыкающих к эпицентру взрыва, усиление термолюминесценции траптов и мутационные эффекты [7—12].

Рассматриваемая модель взрыва позволяет объяснить и обнаруженное в центре района несоответствие азимутального и радиального распределения векторов остаточной намагниченности почв теоретическому [4]. Известно, что при взрывах потоки частиц, несущих значительные электрические заряды, движутся, как правило, неравномерно. Это приводит к появлению меняющихся в пространстве электромагнитных полей и излучению во все стороны мощного, но весьма кратковременного электромагнитного импульса [26], что могло вызвать перемагничивание почв района взрыва.

Итак, что же нового дал подход к Тунгусской катастрофе как к объемному взрыву испарившихся веществ ядра кометы?

Исходя из принятого значения энергии взрыва, оценены масса и размеры «ледяной» части ядра (без учета силикатных и металлических вкраплений), определены пределы скорости тела на заключительном этапе движения. Сочетание полученных оценок массы и скорости объясняет отсутствие баллистической волны даже при малом угле наклона траектории.

Предложен механизм разрушения и взрыва ядра кометы, который подтверждает показания очевидцев пролета космического тела (слабый туманный след, отсутствие у пламени, окружавшем тело, яркой цветовой гаммы, сильные звуковые эффекты и вспышки на всем протяжении полета, множественность взрывов).

Модель объемного взрыва объясняет отмеченную еще Л. А. Куликом особенность ожога ветвей деревьев (наличие «птичьего коготка»), мгновенное действие высокой температуры, отсутствие четкой ориентации ожоговых поражений на живых ветвях лиственниц, а также некоторые особенности лесного пожара — его «мозаичность», возникновение первичного пожара на отдельных, довольно удаленных от эпицентра взрыва, участках.

Исходя из принятого механизма разрушения при нагреве кометных ядер, показано, что начальный и конечный участки траектории полета тела не обязательно должны совпадать по направлению и углу наклона, а ось симметрии картины поражений на местности может не совпадать с направлением траектории заключительного участка полета, чем снята одна из трудностей кометной гипотезы — так называемый «маневр» космического тела.

Предложенная модель взрыва не противоречит наблюдаемой картине вывала и ожога, описывает некоторые общие черты в их структуре.

Объемный взрыв облака, содержавшего большое количество углеводородов, хорошо объясняет запыленность всех слоев мезосферы и мезопаузы мелкодисперсными продуктами взрыва, тем самым снимая еще одну трудность кометной гипотезы — интерпретацию атмосферных оптических аномалий конца июня — начала июля 1908 г. Считалось, что поскольку хвост Тунгусской кометы был задержан в атмосфере Земли на высоте нескольких сотен километров,

то он не мог быть причиной возникновения оптических аномалий, и что они лишь случайно совпали по срокам с Тунгусским взрывом. Однако работа [24] показала связь этих событий, а предложенная модель позволяет понять происхождение всего комплекса оптических явлений — ярких зорь, серебристых облаков и усиления собственной эмиссии ночного неба.

Объемный взрыв с довольно высокой температурой внутри облака и в волне детонации хорошо объясняет небольшое, по сравнению с предполагаемой массой ядра кометы, количество космического вещества, рассеянного в районе взрыва, и появление в торфе отдельных участков со значительным количеством космического углерода.

Наличие в продуктах взрыва оксида азота, оксида углерода и других химически активных веществ, а также высокая температура в волне детонации и взрывных газов объясняют повреждение озонового слоя над районом взрыва и возможные его последствия.

Причиной перемагничивания почв района мог быть мощный электромагнитный импульс, обычно сопровождающий крупные взрывы.

Данная работа носит предварительный характер. Авторы, не претендуя на полноту доказательств и давая скорее качественную или полуколичественную оценку эффектов, хотели показать, что модель объемного взрыва испарившихся при торможении веществ ядра кометы может объяснить весь самый сложный комплекс явления и заслуживает тщательной проверки на современном уровне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В. и др. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 19—24.
2. Андриенко Д. А., Ващенко В. Н. Кометы и корпускулярное излучение Солнца. — М.: Наука, 1981. — 164 с.
3. Бесков С. Д. Технохимические расчеты. — М.: Высшая школа, 1966. — 520 с.
4. Бояркина А. П., Гольдин В. Д., Сидорас С. Д. О территориальной структуре вектора остаточной намагниченности почв в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 163—168.
5. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981. — 416 с.
6. Бронштэн В. А. Серебристые облака и их наблюдение. — М.: Наука, 1984. — 128 с.
7. Василенко Б. В., Демин Д. В., Журавлев В. К. Термолюминесцентный анализ пород из района Тунгусского падения. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 227—231.
8. Васильев Н. В., Батищева А. Г. О связи ускоренного возобновления леса с траекторией падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 149—160.
9. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Пресс К. Ф. и др. Статистическая обработка данных спектрального анализа торфа в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 122—129.
10. Васильев Н. В., Демин Д. В., Журавлев В. К. и др. Современное состояние исследования Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 4—14.

11. Васильев Н. В., Дмитриенко В. К., Федорова О. П. О биологических последствиях Тунгусского взрыва.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 188—195.
12. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Демин Д. В. и др. О некоторых аномальных эффектах, связанных с падением Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 71—87.
13. Дмитриев В. Боеприпасы объемного взрыва.— Зарубежное военное обозрение, 1983, № 9, с. 48—53.
14. Добровольский О. В. Кометы.— М.: Наука, 1966.— 288 с.
15. Зигель Ф. Ю. К вопросу о природе Тунгусского тела.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 151—161.
16. Золотов А. В. К вопросу о возможности пылевой структуры Тунгусского космического тела.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 173—186.
17. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.— Минск: Наука и техника, 1969.— 204 с.
18. Колесников Е. М. Изотопные аномалии в торфе с места падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 49—63.
19. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. Изд. 7.— М.: Наука, 1976.— 255 с.
20. Крынов Е. Л. Тунгусский метеорит.— М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1949.— 195 с.
21. Кулик Л. А. Картина вывала и ожога в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 15—19.
22. Кумаган С. Горение.— М.: Химия, 1980.— 256 с.
23. Львов Ю. А. Углерод в составе Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 83—88.
24. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита/Васильев Н. В., Журавлев В. К., Журавлева Р. К. и др.— М.: Наука, 1965.— 110 с.
25. Петров Г. И., Стулов В. П. Новая гипотеза о Тунгусском метеорите.— Земля и Вселенная, 1975, № 4, с. 74—75.
26. Покровский Г. И. Взрыв и его применение.— М.: Изд-во МО СССР, 1960.— 66 с.
27. Покровский Г. И. Взрыв. Изд. 3.— М.: Недра, 1973.— 182 с.
28. Разин С. А. Оценка координат источника ожоговых повреждений по распределению интенсивности поражающего воздействия в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 66—71.
29. Реми Г. Курс неорганической химии. Т. 1.— М.: Мир, 1972.— 824 с.
30. Станюкович К. П., Бронштэн В. А. О скорости и энергии Тунгусского метеорита.— Докл. АН СССР, 1961, т. 140, № 3, с. 583—586.
31. Станюкович К. П., Шалимов В. П. О движении метеорных тел в атмосфере Земли.— Метеоритика, 1960, вып. 20, с. 54—71.
32. Таблицы физических величин. Справочник.— М.: Атомиздат. 1976.— 1008 с.
33. Фесенков В. Г. О кометной природе Тунгусского метеорита.— Астроном. журнал, 1961, т. 38, вып. 4, с. 577—592.
34. Химический энциклопедический словарь.— М.: Сов. энциклопедия, 1983.— 792 с.
35. Цыбал М. Н. Тунгусский метеорит. Версия химика.— Химия и жизнь, 1985, № 6, с. 78—84.
36. Чурюмов К. И. Кометы и их наблюдение.— М.: Наука, 1980.— 160 с.
37. Эпиктетова Л. Е. Новые показания очевидцев падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 20—34.
38. Ядерные взрывы.— М.: ИЛ, 1958.— 195 с.
39. Cowan C., Atluri C. R., Libby W. F. Possible antimatter content of the Tunguska Meteor of 1908.— Nature, 1965, v. 206, N 4987, p. 861—865.
40. Ganapathy R. The Tunguska Explosion of 1908; Discovery of Meteoritic Deb-

ris near the Explosion Site and at the South Pole.— Science, 1983, v. 220, N 4602, p. 1158—1160.

41. Kresák L. The Tunguska object: A fragment of comet Encke?— Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia, 1978, v. 29, N 3, p. 129—134.
42. Whipple F. I. W. On phenomen related to the Great Siberian meteor.— Quart. J. of the Royal Meteorolog. Soc., 1934, v. 60, N 257, p. 505—513.

С. А. ВИШНЕВСКИЙ, Л. Н. ПОСПЕЛОВА

## ИМПАКТНЫЙ АНАТЕКСИС НА ПРИМЕРЕ УДАРНО-МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ ГНЕЙСОВ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ

Как нами установлено ранее, среди импактитов Попигойской астроблемы широко распространены бирасплавные тагамиты, насыщенные глобулями стекол отличного от матрицы породы состава [6]. Специфика этих стекол по отношению к тагамитам и их родительской породе — архейским метаморфитам — состоит в том, что в глобулях концентрируются кремнезем и окись калия, в то время как окислы натрия, кальция, магния и железа существенно утрачены; двуокись титана и глинозем в целом индифферентны. Происхождение стекла глобулей связывали либо с плавлением аляскитов мишени, либо с сепарацией компонент при импактном плавлении других пород. Предпочтение отдавали второй гипотезе, согласно которой стекло глобулей сегрегировалось из тагамитового расплава путем ударной сепарации или возникло при селективном выплавлении из пород мишени [6]. Результаты дальнейшего исследования подтвердили предположение, что стекло глобулей образовалось при селективном выплавлении.

Для проверки выбранной гипотезы изучены бирасплавные тагамиты бассейна Саха-Юрэгэ. По химическому составу (табл. 1) эти породы не отличаются от других расплавных импактитов астроблемы, источником которых считаются архейские метаморфиты мишени [10]. Особое внимание в определении природы бирасплавных тагамитов уделяли включениям исходных пород района. Оказалось, что данные тагамиты всегда насыщены включениями гранатовых гнейсов и гранулитов (3—5, реже 10%); включений пород иного состава не отмечено. Включения представлены обломками минералов (величиной до первых миллиметров) или литокластами (до первых дециметров), а единичные из них могут достигать нескольких метров в поперечнике. Химический состав изученных включений сходен с составом вмещающих тагамитов (см. табл. 1), а вся совокупность проанализированных тагамитов и их включений близка по химизму к породам группы гранатовых гнейсов ханчанской серии Анабарского щита, описанным в работе [11]. Поэтому последние можно рассматривать в качестве родительской породы по отношению к бирасплавным тагамитам бассейна Саха-Юрэгэ.

Химический состав (вес. %) бирашлавных тагаметов и включений архейских гнейсов в этих породах

№ анализа	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O*	П.п.п.	Сумма
1	430	62,50	0,80	14,06	1,10	5,57	0,07	3,43	3,40	2,33	2,50	0,10	1,40	2,42	99,68
2	431	62,60	0,80	14,90	0,80	5,75	0,07	3,22	3,26	2,33	2,50	0,10	0,84	2,58	99,75
3	1000	63,40	0,77	15,30	0,10	6,95	0,08	3,20	3,01	2,30	2,71	0,09	0,24	2,00	100,15
4	1080	62,00	0,80	14,80	0,13	6,00	0,07	3,57	3,51	2,25	2,75	0,09	0,88	2,69	99,56
5	2112	62,90	0,80	14,80	1,23	6,10	0,07	2,44	3,50	2,15	2,47	0,09	0,43	2,69	99,87
6	2102/1	63,14	0,82	14,60	1,08	6,23	0,08	2,00	3,89	2,20	2,58	0,10	0,30	2,34	99,36
7	2102/2а	69,79	0,58	12,20	1,40	4,77	0,05	0,77	1,56	1,85	2,74	0,08	0,55	2,40	98,74
8	2102/2б	70,43	0,62	12,55	1,41	4,67	0,06	0,80	1,58	1,96	2,05	0,07	0,51	2,23	98,94
9	2102/2в	62,29	0,78	15,20	0,53	6,82	0,08	1,94	3,15	2,20	2,58	0,09	0,53	2,93	99,12
10	2112	71,83	0,67	11,20	1,13	4,74	0,05	0,54	1,90	1,85	1,48	0,08	0,56	2,62	98,65
	*	63,13	0,76	14,68	1,99	4,97	0,08	3,82	3,43	1,96	2,72	Не опр.	2,31		100,01
	**	64,40	0,60	16,60	2,40	3,10	0,10	2,30	4,20	3,10	3,00	*	—	—	100,00

Примечание. 1—10 — количественный химический анализ, 11—12 — тагамет; 13—14 — включения архейских гнейсов, анализированные И. А. Сердюкова, Н. Л. Лютневским (1—4), И. М. Фоминским (5—10), 11—12 — тагамет; 13—14 — включения архейских гнейсов.

\* Средний химический состав тагаметов Попайского кратера по данным [10];

\*\* Средний химический состав архейских пород Анабарского щита без воды и потерь при прокаливания по данным [10].

Петрологическая характеристика бирасплавных тагамитов дана нами ранее [6], а общая систематика и описание включений в импактитах Поппайского кратера приведены в работе В. Л. Масайтиса [9]. По его данным, включения архейских пород, испытавшие ударный метаморфизм I—III ступени \*, несут такие следы пирометаморфизма со стороны тагамитового расплава, как зональные оболочки стекла или частичное плавление в массе (бухитизация). Включения, испытавшие ударный метаморфизм III—IV ступени, т. е. полное или почти полное плавление (импактиты I рода, по [12]), также могут иметь оболочку стекла, но уже за счет частичной гомогенизации [9].

Обычно включения гнейсов в тагамитах рассматривают как объекты, захваченные расплавом из зоны умеренного импактирования. Но такое предположение не может объяснить постоянную насыщенность тагамитов включениями, наблюдаемую и на макро- и на микроуровне, и поэтому надо учитывать возможность иного происхождения таких включений. Она следует не только из петрографических наблюдений, но и из разного рода моделирующих расчетов и опытов. Так, в частности, согласно расчетам и экспериментам [2, 8 и др.], разогрев породы (остаточная температура) после снятия ударной нагрузки начинает резко нарастать, когда давление ударной волны превышает 40 ГПа, так что при нагрузках около 60 ГПа достигается температура плавления большинства горных пород. Кроме того, при одной и той же амплитуде ударного нагружения разогрев породы сильно зависит от ее сжимаемости. Поэтому динамическая гетерогенность сред (полиминеральность, текстурный рисунок, пористость, трещиноватость и прочие факторы, которые контролируют амплитуду нагружения и степень постударного разогрева объемных элементов среды) существенно влияет на их «насыщенность» тепловой энергией и степень разогрева отдельных объемных элементов. В результате этого импактное плавление начинается весьма неравномерно, особенно в случае, когда среднее давление ударной волны близко к некоторым критическим величинам, после разгрузки от которых общее количество тепла, полученное породой, достаточно для плавления основной массы ее компонентов. Очевидно, что в некоторой «пограничной» области ударного нагружения среды импактное плавление захватит не весь объем породы, а только отдельные его элементы — «узлы» концентрации тепловой энергии, где было наибольшее сжатие. В промежутках между сетью таких «узлов» и «жил» оставшая часть породы, своего рода каркас динамической жесткости, не расплавится. Степень ударного проплавления породы в сторону зон с более высокими импульсными нагрузками будет возрастать. Отсюда следует, что включения гнейсов в тагамитах представляют собой отнюдь не инородные тела, захваченные расплавом при транспортировке, а непроплавленные остатки родительской породы. Такое представление удовлетворительно объясняет петрографически наблюдаемые признаки неоднородной тепловой микроструктуры тагамитового расплава, а также повсеместную насыщенность тагамитов вклю-

\* Использована шкала ударного метаморфизма согласно [17].

чениями гнейсов, недостижимую за счет перемешивания макромасс, которое происходило в центробежном донном потоке при экскавации кратера [3, 6]. Аналогично объясняется образование дискретных шпир стекла (своеобразных «включений» импактного расплава, которые пропитывают обломочный базис породы и сварены с ним) в некоторых донных брекчиях астроблемы [4].

Включения гранулитов и гнейсов в бирасплавных тагамитах астроблемы макроскопически делятся на три типа: I — включения без видимых изменений \*; II — частично проплавленные включения, которые состоят из каркаса устойчивых минералов, пропитанного черным стеклом; III — глубокоизмененные включения, от которых остается только «тень» исходной породы, представленная остовом белесых зерен «кварца», промежутки между которыми заполнены стеклом; большая часть такого стекла образует зеленовато-серые, в разной степени раскристаллизованные массы, но некоторое количество черного стекла сохраняется.

Черное стекло, выжатое из гнейсов, часто образует оторочки вокруг включений II и III типов и струйные внедрения в тагамит. Прослежено, как эти внедрения, ветвясь и распадаясь, дают начало каплям-глобулям второго расплава, который не смешивался с матрицей тагамита. Такой текстурный признак происхождения стекол глобулей за счет выплавления гнейсов подтвержден и аналогиями по составу, о чем будет сказано позже.

Изменения гнейсов во включениях есть суммарный итог всех процессов, в том числе и послеударных (отжига, раскристаллизации и пр.). Приведем характеристику этих изменений в выделенных типах включений.

Включения I типа (низкоамплитудный ударный метаморфизм, отжиг и выборочная раскристаллизация некоторых минералов). Биотит-гранатовый гнейс, включение из тагамитов, обнажение 2102. Минералы породы имеют следующие особенности. Кварц представлен диаплектической разностью с густой сетью планарных элементов нескольких систем. Диаплектическими минералами являются и полевые шпаты, которые содержат планарные элементы и частично замещены диаплектическим стеклом. Это стекло при отжиге раскристаллизовалось в тонкозернистые агрегаты, погасающие согласно с невитрифицированной частью минерала. На отдельных участках полевые шпаты были подплавлены, о чем можно судить по агрегатам беспорядочно гаснущих кристаллитов, погруженных в стекло. Химический состав таких агрегатов по каликатровому полевому шпату (табл. 2, ан. 1), видимо, искажен добавлением смешанного расплава и летучих (см. ниже). Плагноклазовое стекло плавления оказалось более устойчивым при изменениях и соответствует олигоклазу № 29 (см. табл. 2, ан. 2). Гранат превращен в тонкозернистые агрегаты оливина в смеси с кордиеритом (фазовый рентгеноструктурный анализ). Валовый состав этих агрегатов (см. табл. 2, ан. 3, 4), за выче-

\* В этих включениях обнаружены пленочные микровыделения стекла, см. ниже.



Химический состав (вес. %) минеральных компонент во включениях ударно-метаморфизованных гнейсов из импактитов

№ анализа	№ образца	Объект исследования	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	2402	«Подплавленный» K—Na полевой шпат	68,87	0,44	12,30	1,70	0,46	0,32	3,86	3,95	94,25*
2		«Подплавленный» плагиоклаз	64,53	—	22,63	0,08	0,02	5,72	6,53	2,53	99,04
3		«Гранат»	44,33	0,06	26,53	20,39	7,79	0,07	0,02	0,43	99,62
4		«Гранат»	46,74	—	24,41	20,40	8,70	0,06	0,02	0,47	100,50
5		Пироксен из оторочки вокруг зерен кварца	53,94	0,58	4,59	26,51	47,60	0,45	0,03	0,05	100,72
6		То же	52,49	0,65	4,89	25,74	48,30	0,45	—	—	99,22
7	2412	«Гранат»: зерна оливины	34,65	0,46	0,08	52,09	13,63	0,08	—	—	100,69
8		То же	34,58	0,48	0,07	51,94	13,00	0,09	—	—	99,85
9		«Гранат»: зерна кордиерита	48,87	0,01	33,50	9,64	7,96	0,02	0,28	4,46	101,43
10		Пироксен из оторочки вокруг зерен «кварца»	52,41	0,33	4,83	34,70	44,20	0,35	—	—	100,83
11	434	«Подплавленный» полевой шпат	74,45	—	41,57	0,21	—	3,45	4,47	3,46	97,03*
12		Герцинит	0,09	0,57	59,35	32,26	6,45	0,03	—	—	98,45
13		Ильменит	—	52,85	—	45,07	2,05	—	—	—	99,97

Примечание. 1—13 — количественный рентгеноспектральный анализ, анализы Л. Н. Посиселова, микроскоп JXA-5A. Содержание железа приведено в пересчете на FeO.

\* Сумма приведена методом сканирования; большой дефицит суммы предположительно связан с присутствием значительного количества легучих.

том вростков кварца и полевых шпатов, рассчитывают как пиропальмандиновый (36,8% и 63,2% соответственно). Биотит превращен в тонкозернистые агрегаты рудного минерала с санидином (?) и кордиеритом (?). В контакте кварца с полевым шпатом и гранатом, а также биотита с полевым шпатом образовались тонкие каймы межзернового стекла плавления (фото 1), составляющие 2,3 об.% шлифа. В контакте с гранатом кварц обрастает оторочкой микролитов бескальциевого феррогиперстена (53% ферросилита, см. табл. 2, ан. 5, 6).

Включения II типа (умеренный ударный метаморфизм, витрификация кварца и полевых шпатов, отжиговая перекристаллизация всех минералов, существенное количество выплавленного черного стекла). Биотит-гранатовый гнейс, включение из тагамитов, обнажение 2112. Минералы породы характеризуются следующими особенностями. Кварц полностью превращен в диаплектическое стекло, которое при отжиге раскристаллизовалось в тонкозернистые агрегаты альфа-кварца с примесью кристобалита и тридимита (фазовый рентгеноструктурный анализ). Эти агрегаты имеют характерную оолитовидную микротекстуру, подобную описанной в работах [5, 16]. Часть полевых шпатов превращена в тонкозернистые агрегаты согласованно гаснущих кристаллитов, хранящие очертания исходного минерала (отожженное апоплагиноклазовое (?) диаплектическое стекло). Другая часть полевых шпатов была расплавлена и раскристаллизовалась в расплывчатые агрегаты беспорядочно гаснущих кристаллитов (калишпат?). Гранат, сохраняя форму кристаллов, замещен микролитами железистого оливина (74% фаялита, см. табл. 2, ан. 7, 8), прорастающими кордиерит (43% железистой разности,  $\text{FeO/MgO} = 1,21$ ; см. табл. 2, ан. 9). Биотит замещен тонкозернистыми агрегатами рудного минерала с санидином (?) и кордиеритом (?). В контакте «кварца» с «полевым шпатом» и «гранатом», а также «биотита» с «полевым шпатом» развиты каймы межзернового стекла плавления с трихитовыми вростками (фото 2). Количество стекла составляет 15—20 об.%. В стекле вокруг «кварца» — оторочки микролитов феррогиперстена (62% ферросилита, см. табл. 2, ан. 10), нарастающие со стороны «граната».

Включения III типа (сильный ударный метаморфизм, плавление всех или почти всех минералов, раскристаллизация кварцевого и тех апоплагиноклазовых стекол плавления, которые сохранились от гомогенизации, рассасывание железомagneйных минералов, калишпата и большинства плагиноклазов). Гнейс, включение из тагамитов, обнажение 431. Ударный метаморфизм и преобразование минералов породы характеризуются следующими особенностями. Кварц превращен в тонкозернистые агрегаты альфа-кварца, кристобалита и тридимита (фазовый рентгеноструктурный анализ). Эти агрегаты имеют округленную форму, но трудно сказать, по какой причине: за счет лешательеритового состояния после разгрузки или вследствие растворения. От полевых шпатов в немногих случаях остаются агрегаты беспорядочно гаснущих микролитов, сохраняющие форму исходных кристаллов или расплывчатые. Присутствие кальция

(см. табл. 2, ан. 11) позволяет рассматривать такие агрегаты как реликты плагиоклаза, состав которого искажен добавлениями смешанного расплава. Скоплений микролитов калишпатового состава не обнаружено. От темноватых минералов остались «тени» — скопления хорошо ограненных кристалликов герцинита (магнезиальная разность, переходная к плеонастам, см. табл. 2, ан. 12). Остальные железо и магний, не вошедшие в состав герцинита, мигрировали к зернам «кварца», где сформировались оторочки ортопироксена, вероятно еще менее магнезиального, чем пироксен в соответствующих оторочках включений I и II типа. Кроме того, часть железа и магния пошла на образование трихитов, насыщающих стекло плавления. Более крупные по сравнению с этими трихитами кристаллики пироксена в оторочках вокруг «кварца», во-первых, указывают на достаточно продолжительную миграцию железа и магния в сторону кварца, где они связывались кремнеземом в устойчивую минеральную фазу, а во-вторых, служат признаком того, что стекло представляло собой довольно устойчивый комплекс соединений и не принимало избыточного количества этих элементов. Кроме трихитов, стекла плавления содержат пластиночки ильменита (см. табл. 2, ан. 13), что можно рассматривать как признак подвижности титана на описываемой стадии изменения породы. Само стекло плавления, на долю которого приходится до 50% объема включения и более (фото 3), представлено двумя разностями: в первой резко преобладает бледно-зеленое, свежее или в различной степени раскристаллизованное смешанное стекло, по-видимому, породного состава, которое можно рассматривать как продукт типичного импактного плавления, подобный стеклам, описанным в работе [7]; во второй в подчиненном количестве наблюдаются шлиры черного стекла со следами гомогенизации, аналогичные межзерновым выплавкам, отмеченным во включениях I и II типа. Таким образом, с ростом интенсивности ударного метаморфизма образование черного стекла начинает сокращаться.

Экспериментальные данные по ударному метаморфизму пород гранулитового состава позволяют оценить амплитуду импульсной нагрузки без учета фактора длительности ударно-сжатого состояния для включений I типа — 22—29 ГПа, для включений II типа — 29—50 ГПа, а для включений III типа — 50 ГПа и выше [1].

В описанной последовательности прогрессирующего изменения гнейсов (включения I—III типов) матрицу бирасплавных тагамитов можно рассматривать как продукт более высокой, IV стадии ударного метаморфизма, в результате которой произошло не только плавление, но и смешение всех минеральных фаз родительской породы (давления более 60 ГПа).

Химический состав стекол глобулей, насыщающих матрицу бирасплавных тагамитов (данные [6] и новые результаты), оказался аналогичен химическому составу черного стекла межзерновых выплавок и оторочек вокруг включений всех типов (табл. 3). Эта аналогия вместе с упомянутым выше текстурным сходством, по нашему мнению, однозначно определяет, что глобули второго расплава есть продукт межзернового выплавления архейских гнейсов.

Химический состав (вес. %) апогнейсовых анатектических стекол (глобулы из бирасплавных тагаметов, оторочки вокруг включений гнейсов, межзерновые выплавки в гнейсах)

№ анализа	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> *	Общая сумма анализов
1	430	74,64	0,52	11,79	1,52	0,17	0,34	1,14	4,71	94,83	—	—
2	431	74,88	0,49	11,48	1,36	0,15	0,31	1,36	4,40	94,43	6,71	101,14
3	1000	75,19	0,49	12,11	1,83	0,22	0,46	2,02	5,65	97,97	—	—
4	1080	74,36	0,63	11,24	1,18	0,14	0,25	0,97	4,34	93,11	7,06	100,77
5	2102/1	73,22	0,20	11,66	1,08	—	0,53	0,46	3,49	90,62	9,40	100,02
6	2124/1	77,09	1,04	12,09	1,13	0,02	0,23	0,24	5,15	96,99	—	104,41
7	2124/1	74,83	0,79	10,87	1,06	0,01	0,21	0,22	4,04	96,02	7,42	103,44
8	2128	72,93	0,62	11,18	1,44	0,04	0,37	0,37	3,50	90,44	—	98,44
9	2128	74,00	0,75	11,27	1,40	0,03	0,36	0,45	3,65	91,90	8,00	99,90
10	431/1	70,88	0,47	12,31	2,19	0,02	0,31	0,14	2,01	88,32	—	—
11	431/1	70,77	0,52	12,07	2,16	0,01	0,31	0,14	2,33	88,30	—	—
12	2112/1	74,73	0,51	11,40	0,98	—	0,27	0,30	3,26	91,45	—	100,95
13	2112/1	72,17	0,47	11,81	1,39	0,01	0,28	0,63	3,89	90,65	9,50	100,15
14	431/1	72,89	0,12	11,72	1,05	0,03	0,26	0,23	2,52	88,80	—	—
15	431/1	71,92	0,15	12,03	1,55	0,02	0,31	0,59	4,30	90,86	—	—
16	2102/1	75,49	0,77	11,63	1,78	0,19	0,42	1,49	4,79	96,54	—	—
17	2102/1	75,71	0,62	11,85	1,52	0,10	0,45	1,48	4,70	96,42	—	—
18	2102/1	73,63	0,44	11,24	1,34	0,03	0,49	0,40	3,70	91,27	—	—
19	2102/2	72,30	0,11	12,07	1,55	0,13	0,31	1,19	3,85	91,50	—	—
20	2102/2	72,60	0,10	12,09	1,18	0,08	0,33	1,42	4,14	91,93	—	—
21	2102/2	72,28	0,07	12,22	0,97	0,05	0,46	1,10	3,74	90,88	—	—
22	2102/2	74,31	0,03	11,68	1,44	0,13	0,38	1,33	3,76	93,05	—	—
23	2102/2	74,59	0,12	11,60	1,45	0,13	0,48	0,85	3,35	92,57	—	—
24	2102/2	77,65	0,23	12,66	1,39	0,12	0,38	1,91	4,47	98,81	—	—
25	2102/2	74,69	0,14	12,04	1,46	0,12	0,46	1,22	3,86	93,98	—	—
26	2112/1	73,80	0,20	11,32	1,60	0,02	0,27	0,24	2,58	90,02	—	—
27	2112/1	72,25	0,42	11,52	1,28	—	0,29	0,31	3,60	89,67	—	—

Примечание. 1—27 — количественный рентгеноспектральный анализ (метод сканирования), анализ Л. Н. Поспелова, микрозонд ЖХА-5А. Содержание железа приведено в пересчете на FeO. 1—9 — глобулы из матрицы бирасплавных тагаметов; 10—15 — оторочки вокруг включений гнейсов в бирасплавных тагемитах; 16—27 — межзерновое стекло в гнейсах. 1, 2, 4 — среднее по 4 анализам, 3 — среднее по 5 анализам [6].

\* Отдельные определения методом СНН-метрии (см. табл. 4).

Содержание (вес. %) и состав летучих в апогнейсовых анатектических стеклах из тагамитов, вычисленные по данным прецизионной CHN-метрии

№ образца	Углерод			Водород		Азот	Суммарное содержание летучих $H_2O + CO_2$	Суммарное содержание летучих $H_2O + CO_2 + CO$
	установленное количество	пересчет на $CO_2$	пересчет на $CO + CO_2$ *	установленное количество	пересчет на $H_2O$			
431	0,48 0,58	1,76 2,13	$0,30 + 1,28 = 1,58$ $0,37 + 1,54 = 1,91$	0,53	4,77	—	6,71 **	6,52 **
1080	0,58 0,70	2,13 2,57	$0,19 + 1,83 = 2,02$ $0,23 + 2,20 = 2,43$	0,53 0,65	4,77 5,85	— —	7,66 **	7,54 **
2102/1	0,82	3,01	$0,51 + 2,20 = 2,71$	0,71	6,39	—	9,40	9,10
2112/1	0,70	2,57	$0,16 + 2,31 = 2,47$	0,77	6,93	—	9,50	9,40
2124/1	0,87	3,19	$0,14 + 2,97 = 3,13$	0,47	4,23	—	7,42	7,36
2128	0,88	3,23	$0,14 + 3,01 = 3,15$	0,53	4,77	—	8,00	7,92

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории микроанализа НИОХ СО АН СССР, аналитик В. П. Фадеева, CHN-анализатор фирмы «Hewlett-Parked», модель 185. Вес каждой навески 0,7 мг.

\* Пересчет на  $CO + CO_2$  произведен по соотношению  $CO/CO_2$ , приведенному в табл. 5.

\*\* Из двойных определений компонента взято среднее.

Дефицит суммы анализов (1—12 вес. %), отмеченный в работе [6] и в новых данных (см. табл. 3), для исключения инструментальной погрешности был проверен неоднократно дублирующими анализами с применением различных эталонов, а также методом сканирующей съемки при расфокусированном зонде. Для наиболее «дефицитных» стекол снимали полные рентгеновские спектры, чтобы исключить примесь иных, нежели главные петрогенные окислы, компонентов.

Дефицит суммы анализов оказался связанным с большим количеством летучих в стеклах, что было установлено методом CHN-метрии шести образцов стекла (табл. 4). Хроматографический анализ продуктов валовой термодегазации бирасплавных тагамитов (табл. 5) показал, что основные летучие компоненты этих пород — вода и углекислый газ, в меньшей степени — окись углерода; прочими компонентами можно пренебречь. Используя полученные данные, обнаруженный в стеклах методом CHN-метрии водород пересчитали на воду, а углерод — на  $CO_2$  (первый вариант) и на смесь  $CO + CO_2$  в указанном в табл. 5 соотношении (второй вариант). Рассчитанные количества летучих, приведенные в табл. 4, покрывают дефицит анализов стекол (см. табл. 3) и показывают, что при межзерновом выплавлении гнейсов в расплав мобилизовывались не только кремнезем и окись калия, но и летучие  $H_2O + CO_2 (+ CO)$ .

Какое место среди продуктов импактного плавления и последующих процессов занимают межзерновые выплавки в гнейсах, послужившие источником глобул второго расплава в описываемых тага-

## Состав и содержание (мг/кг) летучих, выделенных из тагамитов при термодегазации

№ образца	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
431	38,1	14,0	Сл.	4,0	7 000	—	—	4,0
1080	66,2	11,1	1,1	13,7	24 040	—	—	4,2
2102/1	44,0	16,1	1,2	15,0	11 110	—	—	—
2112/1	103,1	12,0	1,0	15,0	33 650	—	—	4,5
2124/1	112,0	8,4	Сл.	Сл.	26 700	—	—	4,5
2128	239,0	18,6	»	»	26 650	—	—	4,2

Примечание. Валовой хроматографический анализ, аналитик Л. Н. Фомина, двухколонковый хроматограф с детектором по теплопроводности, температура дегазации 600°C.

митах? Эти выплавки представляют собой анатектическое стекло, на что указывают межзерновая форма их выделений, мобилизация летучих, а также специфика и устойчивость химического состава данных выделений, не зависящего от состава контактирующих минералов и постоянного для образцов из различных обнажений. По перечисленным особенностям этот анатектический расплав значительно отличается от продуктов «классического» импактного плавления в ударных волнах большой амплитуды — смешанных стекол апогнейсового состава (матрица бирасплавных тагамитов), мономинеральных стекол плавления в импактитах I рода, псевдотрахитовых стекол или стекол смешанного состава с резко выраженным ударным типоморфизмом, подобных описанному в работе [7].

В рамках известных представлений об импактных процессах выплавление анатектического стекла в ударно-метаморфизованных гнейсах объясняется следующим образом. Согласно петрографическим критериям, анатектические стекла содержатся в гнейсах, которые испытали импульсную нагрузку от 22—29 до 50 ГПа и выше (включения I—III типа); выше этих давлений минеральная структура гнейсов ликвидировалась, образуя смешанные расплавы. А согласно данным экспериментов и расчетов, обобщенных в работах [12, 15 и др.], при разгрузке от указанных давлений остаточная температура гнейсов (если взять в качестве репера кварц) составляла от 400 до 1700°C, в том числе 700—800° после давлений 27—30 ГПа. При таких остаточных температурах выплавление анатектического стекла в гнейсах вполне допустимо за счет послепударного разогрева даже во включениях I типа, если их охлаждение не было закалочным. Примером анатексиса гнейсов за счет постударного разогрева являются межзерновые выплавки в группе крупных включений гнейсов обнажения 2102. Эти включения-глыбы до 3—5 м в поперечнике испытали ограниченное термальное воздействие со стороны тагамитов (залегают у подошвы одного из тагамитовых тел и не имеют оторочки подплавления), но по всему объему насыщены межзерновыми выделениями анатектического стекла (см. описание включения 2102). Медленное охлаждение толщ импактитов способствовало

развитию анатектических процессов не только за счет собственного ударного разогрева пород, но и за счет конвективной передачи тепла от более разогретых компонентов ударно-метаморфического комплекса астроблемы. В качестве примера вынужденного анатексиса можно привести выделения межзерновых стекол в гнейсах вследствие пирометаморфизма и бухитизации включений со стороны тагамитового расплава [9].

Однако далеко не все анатектические стекла можно считать продуктами выплавления исключительно на послееударном этапе эволюции импактитов астроблемы. Постударный, назовем его поздним, анатексис объясняет образование межзерновых стекол во включениях гнейсов из тагамитов и глыбах этих пород в других импактитах кратера. Что касается глобулей анатектического стекла, которые насыщают матрицу бирасплавных тагамитов, уже не имея связи с включениями гнейсов, то их положение нам представляется особым. Внедрение этих стекол в тагамитовый расплав и рассеивание в нем трудно объяснить смещением импактитов на постударном этапе (при транспортировке и отложении в составе центробежного донного потока). Чтобы достигнуть наблюдаемого насыщения матрицы тагамитов глобулями (вспомним, что размер этих глобулей подчас снижается до 100 мкм и менее), необходимо перемешивание расплава на субмикроскопическом уровне. Такое перемешивание возможно только в ударно-нагруженном состоянии, поскольку именно для этого состояния характерны интенсивные микроградиенты течения вещества, после полного разгрузки среды быстро снимаемые силами вязкостного трения [7]. Этому выводу не противоречат и геологические данные (структура толщ донных отложений и особенности контактов ее компонентов), согласно которым при транспортировке в центробежном донном потоке неограниченная смешиваемость тагамитов с другими импактитами отсутствовала. Напротив, смещение происходило на уровне взаимодействия макромасс без широкого развития явлений гомогенизации, которые ограничивались, как правило, маломощными зонами на контакте или вовсе отсутствовали [3, 6]. Из этого логически следует, что и в самом тагамитовом расплаве на постударном этапе транспортировки отсутствовали интенсивные микроперемешивающие течения. Поэтому глобули анатектического стекла, насыщающие матрицу бирасплавных тагамитов, мы рассматриваем как продукты раннего выплавления, происшедшего еще в ударно-нагруженном состоянии. На какой стадии импактирования (фронт ударной волны — сжатое состояние — разгрузка — полная разгрузка) могло реализоваться такое выплавление? Известно, что при импульсной нагрузке амплитудой даже в несколько сот гигапаскалей горные породы остаются в твердом состоянии и начинают плавиться только при частичном или полном разгрузке [15]. Следовательно, раннее анатектическое выплавление гнейсов могло начаться лишь при некотором низком уровне остаточных ударных давлений. Непременным фактором реализации раннего анатексиса является его достаточная продолжительность, т. е. требуется довольно существенный период времени (в масштабах импакт-

ных процессов), в течение которого происходит полное снятие ударных давлений. Такие условия можно ожидать только при исключительно крупных импактных событиях, и бирасплавные тагамиты, видимо, есть принадлежность только гигантских астроблем.

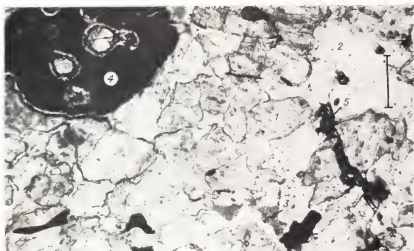
И раннее, и позднее анатектическое выплавление гнейсов, описываемое в данной работе, весьма специфично по особенностям реализации (источник энергии,  $P - T$ -параметры и др.), и поэтому мы предлагаем рассматривать его в качестве *импактного анатексиса*. Насколько можно судить по литературе, к следам импактного анатексиса в других астроблемах можно отнести обогащенные калием реакционные каймы стекла вокруг шпир лешательерита, описанные В. Штеле [19] в зювитах кратера Рис. Это обогащение В. Штеле рассматривал как интересный, но непонятный эффект. Анатектические стекла в зювитах кратера Рис (отложениях взрывного облака, испытавших фреатическую экскавацию и закалочное охлаждение) служат еще одним доказательством существования раннего импактного анатексиса.

Для обоих типов импактного анатексиса (раннего и позднего), как уже упоминалось, фактор времени является решающим. В этой связи интересно отметить, что в поздних зювитах, клипеновых брекчиях, мегабрекчиях и других продуктах, доставленных из сектора приповерхностного импактирования астроблемы [6], анатектические стекла во включениях гнейсов пока не обнаружены, несмотря на то что породы могут содержать признаки ударного метаморфизма I—III ступени вплоть до появления псевдотахилитовых и смешанных породных стекол типа описанных в работе [7]. Отсутствие анатексиса гнейсов в указанных импактитах объясняется чрезвычайной скоротечностью и неравномерностью ударного метаморфизма пород в этом секторе, а также закалочным режимом охлаждения продуктов изменения. Вероятно, по этой же причине импактный анатексис обоих типов не успевает развиваться при ударно-взрывных и сопутствующих им далее процессах малого масштаба, о чем можно судить по отсутствию описания сходных эффектов в литературе, посвященной хорошо изученным мелким астроблемам.

Благоприятные условия протекания раннего анатексиса можно ожидать в центральном секторе импактирования Попигаевского кратера, где зафронтальные волновые процессы (ударно-сжатое состояние и разгрузка) были самыми продолжительными, вплоть до 1 с, по оценкам [8], и характеризовались плавным градиентом, приближаясь к квазистатическому типу процессов сжатия и разогрева. В наибольшей степени это касается тех импактированных пород, которые первоначально залегали в наиболее глубоких горизонтах разреза мишени под центром кратера. Условия для протекания позднего анатексиса (достаточные глубины и длительность охлаждения) создавались в глубинных областях центрального сектора импактирования под днищем кратера и в мощных толщах донных отложений.

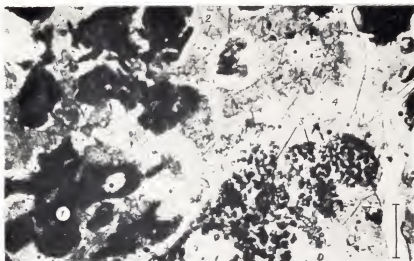
Сделаем некоторые заключения о вещественном составе импактитов глубинных зон астроблем и источнике расплава для различных тагамитов в их пределах. В совокупности концентричных зон регрес-





**Фото 1.** Ударно-метаморфизованный биотит-гранатовый гнейс, включение I типа.

1 — диалектический кварц; 2 — диалектический плагиоклаз; 3 — агрегаты раскристаллизованного апоалитипатного стекла; 4 — аниогранатовый скрытокристаллический агрегат оливины с кордьеритом; 5 — агрегаты новообразований по биотиту. На контактах минералов выделилось межзерновое анатектическое стекло. Шлиф 2102, без анализатора, масштаб 500 мкм.



**Фото 2.** Ударно-метаморфизованный биотит-гранатовый гнейс, включение II типа.

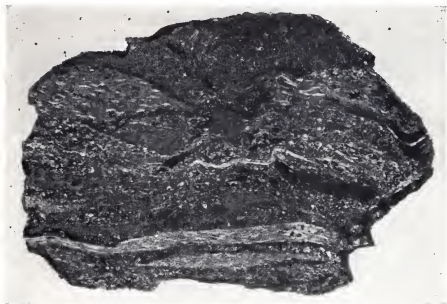
1 — раскристаллизованное диалектическое кварцевое стекло; 2 — раскристаллизованный маскелинит; 3 — оливинокордьеритовый агрегат новообразований по гранату; 4 — выделения анатектического стекла. Шлиф 2112, без анализатора, масштаб 500 мкм.



**Фото 3.** Ударно-метаморфизованный гнейс, превращенный в «импактит первого рода» (включение III типа).

1 — тонкозернистые агрегаты минералов кремнезема по исходному кварцу гнейса; 2 — реликты раскристаллизованного стекла по исходному плагиоклазу гнейса; остальная часть рисунка — смешанное стекло плавления с микролитами ильменита, пироксена и других минералов. Шлиф 431, без анализатора, масштаб 500 мкм.

**К ст. Э. Н. ПЗОХА «ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД...»**



**Фото 1.** Обр. 43г (11 × 7 см). Импактит 1-го рода по мелкогалечному туфоконгломерату  $C_1$  с признаками пластического течения, но без расплавления.



Фото 2. Обр. 27а (17×14 см). Импактит 1-го рода по туфопесчаннику С<sub>1</sub>; обломки в черном шлаке (см. ан. 10 в табл. 11).

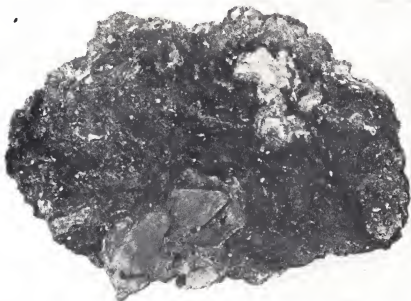


Фото 3. Обр. 26г (17×12 см). Основной импактит-шлак с обломками бордовых импактитов 1-го рода (см. ан. 4, 8 в табл. 11; ан. 1 в табл. 12).



Фото 4. Обр. 39д-1 (10×5 см). Черная пемза с включениями импактитов 1-го рода и полосой желтой пемзы.

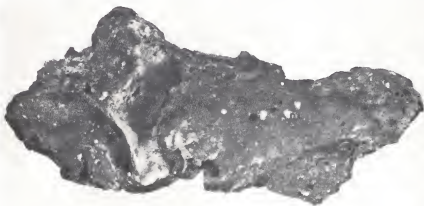


Фото 5. Обр. 45а (16×5 см). Бомба основного жамавинита с каверной и мелкими включениями импактитов 1-го рода.



Фото 6. Обр. 42з (15×11 см). Бомба основного жаманнитта с включением шлака, с кавернами.



Фото 7. Обр. 42в (20×10 см). Крупная бомба-«завертыш» основного жаманнитта.



Фото 8. Обр. 42а (20×8 см). Бомба-«капля» основного жаманшинита.

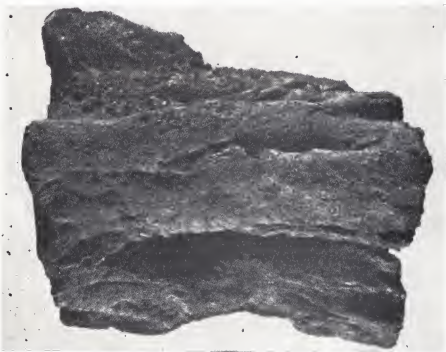


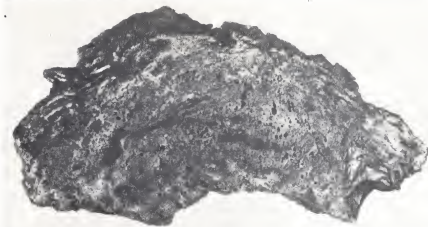
Фото 9. Обр. 42б (11×5 см). Жгутово-канатная поверхность бомбы основного жаманшинита.



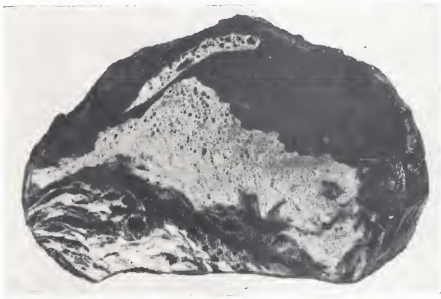
Фото 10. Обр. 45ж (6х5 см). Мелкая ягтуовая бомба основного стекла.



Фото 11. Обр. 11 (тельца от 0,5 до 1 см). Внизу — кислые кризисты, сверху — обломки основных пмакитов, справа — ланцелии основного состава.

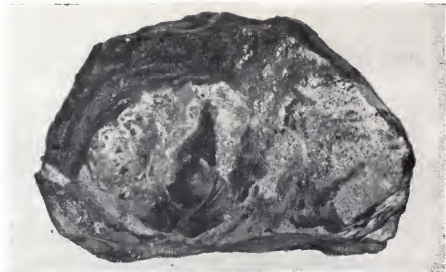


**Фото 12.** Обр. 36д (16×6 см). Бомба желтой пемзы с участками стекла и включениями черной пемзы.

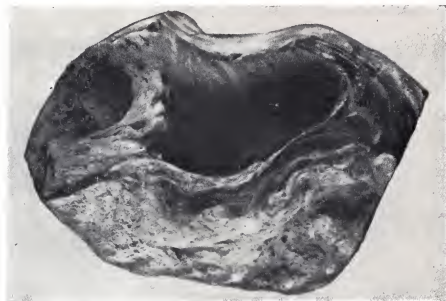


**Фото 13.** Обр. 37ж (12×6 см). Включения желтой пемзы в тектите-жаманните.





**Фото 14.** Обр. 37ж (обратная сторона). «Вихревал» каверна в тектите-жаманшните, заплываемая желтой пемзой.



**Фото 15.** Обр. 37б (24, 15 см). Смесь тектита-жаманшните и желтой пемзы с крупными полостями.



**Фото 16.** Обр. 37р (15 × 8 см). Смесь черной основной пемзы (справа), желтой пемзы и умеренно кислого желтоватого стекла (слева).



**Фото 17.** Обр. 45в (10 × 7 см). Включение плотной желтоватой породы в тектите-жаманшните.

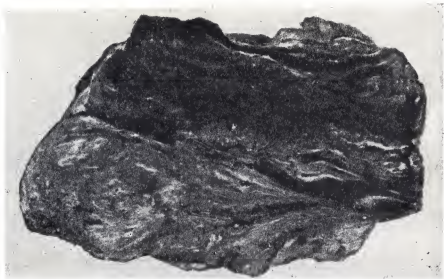


Фото 18. Обр. 2в ( $11 \times 6$  см). Массивный тектит-жаманшинит с участками плотной «пены».

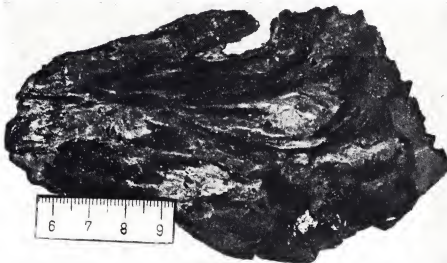


Фото 19. Обр. А-81-1 ( $10 \times 5$  см). Массивный тектит типа Муонг-Нонг, аналогичный предыдущему. Сев. Вьетнам, район г. Винь.



**Фото 20.** Обр. 20-5 (12,6 см). Слоистый тектит-жаманшинит с трубчатыми каналами (продольный распил).



**Фото 21.** Обр. А-82 (9,6 см). Слоистый тектит тина Муонг-Нонг с трубчатыми пустотами (поперечное сечение). Сев. Вьетнам, район г. Винь.



Фото 22. Обр. 31а (15×10 см). Бомба тектита-жамавшинита с плойчатой слоистостью.

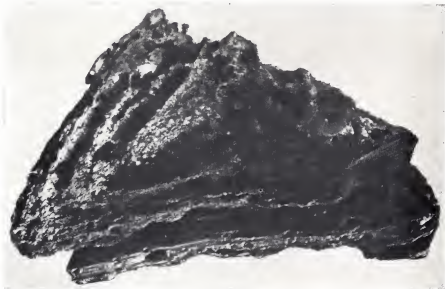
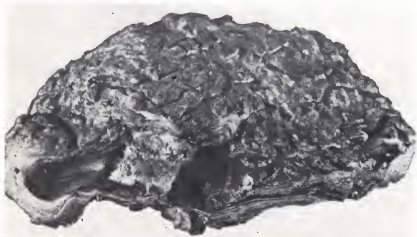


Фото 23. Обр. А-55 (10×5 см). Обломок бомбы тектита типа Муонг-Понг с плойчатой слоистостью. Юж. Вьетнам, район г. Дананг.



*Фото 24.* Обр. А-81-2 (8×5 см). Бомба тектита с крупной сквозной полостью. Сев. Вьетнам, район г. Винь.



*Фото 25.* Образец Я. И. Бойко (20×10 см). Бомба тектита-жаманшинита с поверхностью «хлебной корки».

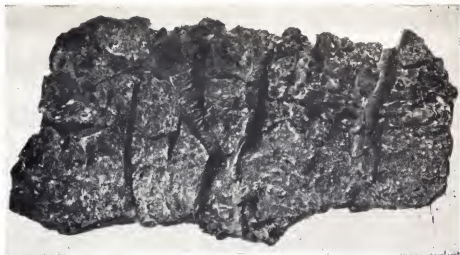


Фото 26. Образец П. В. Флоренского, ранее опубликованный в [19] (8,4 см). Поверхность бомбы тектита-жаманинита типа «хлебной корки» с признаками пластического растяжения трещин.



Фото 27. Обр. А-82-1 (10,8 см). Поверхность обломка бомбы тектита типа Муонг-Нонг с трещинами-распилами и признаками их пластических деформаций, Сев. Вьетнам, район г. Винь.



**Фото 28.** Обр. 43б (18, 12 см). Тектит-жаманинит с кавернами «вихревого выдувания» и гризитоподобными отростками.



**Фото 29.** Обр. 31ж (12×9 см). Бомба тектита-жаманинита с «вихревыми» структурами. Видны трещины-распилы.



сивного ударного метаморфизма, возникших в мишени сразу же после происхождения импульсной нагрузки, область импактного анатексиса гнейсов (будем считать его только поздним) может быть ограничена барическим интервалом 27—50 ГПа (остаточные температуры породы соответственно 700—1700°C). Типичные представители пород, доставленные из этой области при экскавации, — анатектизированные гнейсы крупного включения 2102. Возможно, что область анатектизированных гнейсов не была до конца разрушена процессами экскавации, и ее остатки залегают под днищем в области центрального поднятия кратера, испытав только связанные движения различной амплитуды. Согласно петрологическим заключениям, далее по интенсивности изменений в центральном секторе импактирования идет зона частичного, а затем и все более полного ударного плавления гнейсов, где сформировались импактиты I рода и бирасплавные тагамиты. В этой зоне происходили не только образование смешанных породных стекол, но и ранний импактный анатексис гнейсов. В следующих по направлению к центру взрыва зонах более интенсивного импактирования гнейсов минеральная структура породы быстро ликвидировалась процессами ударного смешения и возможностей для раннего анатексиса не создавалось. В этих зонах формировались остальные тагамитные расплавы астроблемы.

Значение импактного анатексиса, особенно его ранней разновидности, как нам представляется, несколько выходит за рамки частной характеристики плавления горных пород в крупной астроблеме. Импактные анатектиты есть продукт крупномасштабного квазистатического «эксперимента», поставленного природой, и их изучение поможет пониманию происходящих в недрах Земли процессов, в частности процесса мантийного анатексиса. Температуры и в том, и в другом случае сопоставимы, равно как и давления на ударном этапе импактного анатексиса могут достигать значений, свойственных верхней мантии. Принципиальным выглядит различие в длительности процессов, но, с другой стороны, характеристика явления вне временных рамок может в ином случае полнее раскрыть его суть.

В этом отношении привлекают внимание следующие особенности импактного анатексиса, вероятно взаимосвязанные друг с другом:

- повышенная мобильность калия, благодаря чему происходит абсолютное обогащение расплава этим компонентом; напротив, натрий участвует в процессе гораздо слабее и в основном утрачивается расплавом;

- активная роль летучих ( $H_2O + CO_2$ ) и их способность накапливаться в анатектическом расплаве в условиях *открытой системы*.

Видимо, не случайно наиболее впечатляющие результаты экспериментов, моделирующих анатексис как источник выплавления высококальциевых глубинных магм, достигаются, когда объекты опытов, производившихся в условиях *закрытой системы*, насыщены флюидом  $H_2O + CO_2$  [13].

Естественно, что мантийный и импактный анатексис различны не только по продолжительности процесса, но и по вещественному

составу объектов изменения. Но тем более отчетливо проявляется такая универсальная особенность геохимии Si, K и летучих ( $H_2O + CO_2$ ), как их повышенная мобильность начиная с определенного этапа физико-химического состояния вещества. В этом отношении данные, полученные по импактному анатексису, возможно, представляют интерес для понимания проблемы генезиса высококальциевых глубинных магм в том виде, как она поставлена В. С. Соболевым [14], И. Д. Рябчиковым [13, 18] и другими исследователями.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Н. А. Пальчик (рентгеноструктурный анализ), И. М. Фоминых, П. А. Сердюковой и Н. Л. Литвиненко (химические анализы), Л. Н. Фоминой (хроматографические определения газов) и В. П. Фадеевой (CHN-метрическое определение летучих в стеклах), без помощи которых данная работа стала бы невозможной. Кроме того, мы весьма признательны Н. В. Попову за полезные консультации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бадюков Д. Д. Экспериментальное моделирование ударного метаморфизма минералов.— В кн.: Импактиты. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 20—35.
2. Вальтер А. А., Рябенко В. А. Взрывные кратеры Украинского щита.— Киев: Наук. думка, 1977.— 154 с.
3. Вишневский С. А. Импактиты гигантских сложных метеоритных кратеров.— В кн.: Импактиты. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 171—184.
4. Вишневский С. А., Долгов Ю. А., Ковалева Л. Т., Пальчик Н. А. Стишловит в породах Попигайской структуры.— Геол. и геофиз., 1975, № 10, с. 149—156.
5. Вишневский С. А., Пальчик Н. А. Графит в породах Попигайской структуры: разрушение и переход в другие фазы системы углерода.— Геол. и геофиз., 1975, № 1, с. 67—75.
6. Вишневский С. А., Поспелова Л. Н. Некоторые петролого-геохимические особенности проблемы импактных взаимодействий.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 156—191.
7. Вишневский С. А., Ставер А. М. Некоторые особенности деформации и плавления при ударном метаморфизме.— Геол. и геофиз., 1985, № 2, с. 22—30.
8. Геология и петрология взрывных метеоритных кратеров/Рябенко В. А., Вальтер А. А., Гуров Е. П. и др.— Киев: Наук. думка, 1982.— 226 с.
9. Масайтис В. Л. Включения в импактитах.— Метеоритика, 1982, вып. 40, с. 107—112.
10. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попигайский метеоритный кратер.— М.: Наука, 1975.— 124 с.
11. Рабкин М. И. Геология и петрология Анабарского кристаллического щита.— М.: Госгеолтехиздат, 1959.— 164 с.
12. Райклин А. И., Селивановская Т. В. Брекчия и импактиты взрывных метеоритных кратеров и астроблем.— В кн.: Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука, 1979, с. 65—80.
13. Рябчиков И. Д., Грин Д. Х. Роль двуокиси углерода в петрогенезисе высококальциевых магм.— В кн.: Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1978, с. 49—64.
14. Соболев В. С. Строение верхней мантии и способы образования магмы.— М.: Наука, 1973.— 34 с.
15. Ударные кратеры на Луне и планетах/Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Флоренский К. П. и др.— М.: Наука, 1983.— 200 с.
16. Carlens H. Thermal history of impact melt rocks in the Phennoscandian shield.— Contribs Mineral. and Petrol., 1975, v. 50, N 2, p. 145—155.

17. Engelhardt V. W., Stoffler D. Stages of shock metamorphism in the crystalline rocks of the Ries Basin, Germany.— In: Shock metamorphism of natural materials. Baltimore: Mono Book Corp., 1968, p. 159—168.
18. Ryabchikoff I. D. Hydrothermal reactions in the Earth's mantle.— In: Proceedings of the 1st International Symposium on Hydrothermal Reactions, Tokyo, March 22—26, 1983. Tokyo, 1983, p. 244—257.
19. Stahle V. Impact glasses from the suevite of the Nordlinger Ries.— Earth and Planet. Sci. Lett., 1972, v. 17, N 1, p. 275—293.

С. А. ВИШНЕВСКИЙ

## КРАЕВАЯ ЧАСТЬ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ: ИМПАКТНЫЕ ДИАТРЕМЫ И ГОРСТЫ, НОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ

Краевая часть Попигайской астроблемы в породах осадочного чехла, на долю которого приходится примерно  $3/4$  периметра кратера, представляет собой область характерных клипшеновых деформаций [2, 6, 8]. Эти деформации по отдельным радиусам прослеживаются на расстояние до 50 км от центра астроблемы.

Осадочный чехол подстилается архейскими кристаллическими породами фундамента и состоит из отложений верхнего протерозоя, кембрия и перми, к которым в весьма ограниченном объеме добавляются породы триасового и мелового возраста. Отложения протерозойской группы, которые развиты к западу от кратера, представлены в основном кварцитопесчаниками мукунской серии мощностью до 500 м. К востоку и юго-востоку от кратера мощность мукунской серии сокращается до 60 м, но в разрезе протерозойских отложений появляются налегающие выше терригенно-карбонатные породы билляхской серии (мощность от 270 до 340 м), а затем староречепской свиты (мощность 120—140 м). Терригенно-карбонатные и карбонатные породы кембрия (алданский и ленский ярусы, отложения среднего и верхнего отделов) развиты в северо-западном, восточном и юго-восточном бортах астроблемы и имеют мощность до 550 м. Терригенные отложения пермской системы (песчаники, пески, алевриты и песчано-глинистые сланцы) распространены к северу от кратера и имеют мощность от 120 до 230 м. Триасовые породы (туфы базальтов и туфогенно-осадочные отложения) образуют небольшие останцы мощностью до 20—30 м, встречающиеся к северу от астроблемы, а меловые породы (пески и песчано-глинистые углистые отложения) общей мощностью до 30—45 м сохранились лишь в мелких депрессионных структурах к востоку и северу от борта кратера.

Изверженные породы, залегающие в толще осадочного чехла, представлены позднепротерозойскими и раннетриасовыми интрузиями. Позднепротерозойские интрузии (диабазы и габбро-диабазы) образуют немногочисленные маломощные дайки в мукунских кварцитопесчаниках, главным образом к западу от астроблемы. Раннетриасовые интрузии (силлы и дайки долеритов, реже трахидолериты)

тов) широко распространены в пермских и кембрийских отложениях к северу и северо-западу от кратера. Мощность даек достигает 100—150 м, а протяженность на дневной поверхности — нескольких километров.

Доимпактная дизъюнктивная тектоника в породах чехла выражена сериями разломов субширотного-субмеридионального, северо-западного и других направлений. Эти разрывные нарушения преобладают в северном и северо-западном обрамлении кратера, где многие из них приурочены к региональной зоне глубинных дислокаций, которая в субширотном направлении разделяет Анабарское сводовое поднятие и Лено-Анабарский прогиб. Многие из дизъюнктивных нарушений, в особенности разломы субширотного и западно-северо-западного направления, послужили подводящими каналами раннетириасовых секущих интрузий.

Характеристика особенностей коптогенного комплекса Попигайской астроблемы основана на опубликованных материалах В. Л. Масайтиса, М. В. Михайлова, М. С. Мащака, А. И. Райхлина и других исследователей [5—8], а также на полевых наблюдениях автора, проведенных в 1971—74 гг. Расчленение и описание импактных фаций астроблемы дается в соответствии со схемой классификации импактитов больших кратеров, изложенной в диссертационной работе автора и публикациях [1, 2].

Зона клипеновых деформаций, или клипеновая брекчия, которая слагает краевую часть астроблемы, имеет ширину 12—14 км. В пределах этой зоны породы чехла расчленены на блоки-клиппены площадью от нескольких гектаров до нескольких квадратных километров с видимой мощностью в десятки и сотни метров. Одни клиппены представляют собой фрагменты или кембрийских карбонатных толщ, или протерозойских кварцитопесчанников; другие являются фрагментами осадочной толщи с двучленным строением, включающей обе отмеченные разности пород. Внешняя краевая часть зоны клиппенов, особенно там, где эта зона оканчивается системами выпуклых центробежных взбросонадвигов, придает контурам астроблемы фестончатые очертания. За пределами зоны клиппенов, в обрамлении кратера залегают слабовозмущенные породы чехла. При дешифрировании разреза осадочных толщ по долинам р. Рассоха и ее притоков и некоторых других территорий отмечается, что породы обрамления находятся в основном в ненарушенном субгоризонтальном залегании, которое осложняется только региональной тектоникой. К собственно импактным дислокациям, связанным с образованием Попигайской астроблемы, здесь можно отнести некоторые радиальные разломы, следы подновления древних дизъюнктивных нарушений, а также диатремы, горсты и зоны площадного дробления. Анализ гидрографической сети и материалы дешифрирования [6] показывают, что слабопроявленные деформации осадочных пород в обрамлении кратера могут быть прослежены на расстоянии до 70—80 км от его центра. Зона клиппенов имеет характерный грядово-холмистый рельеф.

Один из распространенных типов деформации осадочных толщ в зоне клиппенов — разноамплитудное вертикальное смещение бло-

ков, которое сопровождалось короблением и перекосом (по-видимому, с разворотом) слоев и образованием пологих складок. В результате таких деформаций некогда субгоризонтальные пласты или поверхности раздела оказались расчленены и от клиппена к клиппену вынесены на различный гипсометрический уровень с произвольным направлением наклона, но без нарушения нормальной стратиграфической последовательности напластования. Этот тип деформации особенно развит в краевой части зоны клиппенов. Другой широко распространенный тип деформации — надвиговые и взбросонадвиговые дислокации, когда перемещение клиппенов приводило к нарушению аллохтоном нормальной стратиграфической последовательности напластования. Слои в надвигах, испытывая смятие и коробление, в целом сохраняют пологое залегание, но амплитуда латерального смещения может меняться от сотен метров до 1 км. Слои во взбросонадвигах наклонены довольно круто, вплоть до пачек, поставленных «на голову» (например, в бассейне р. Буордах) и, вероятно, опрокинутых. Амплитуда вертикальных смещений во взбросах достигает более 100 м. Плоскости большинства надвигов и взбросов наклонены к центру астроблемы, образуя центробежную систему. Ряд взбросонадвигов группируется в параллельные контуры кратера системы дислокаций. В целом взбросонадвиговые нарушения свойственны краевой части зоны клиппенов, а пологие надвиги — внутренней части этой зоны. Породам из клиппенов присущи интенсивная объемная трещиноватость, а местами появление брекчий «грис» и «мегагрис», что более характерно для мукунских кварцитопесчаников.

Степень деформированности чехла в пределах зоны клиппенов к центру астроблемы нарастает, хотя и не всегда равномерно на конкретных радиусах. Изменения заключаются в том, что в указанном направлении уменьшается размер клиппенов (хотя отдельные «чешуи» кембрийских и протерозойских пород поперечником до 1 км можно наблюдать на значительном удалении от внешнего края астроблемы, например в правобережье Саха-Юрэгэ), появляются многократные пологие надвиги аллохтона с полным нарушением стратиграфической последовательности напластования и наконец зона приобретает структуру хаотической смеси различных по крупности глыб и фрагментов пород мишени. Далее по латерали клиппеновая брекчия с качественно-количественным переходом сменяется новым фациальным типом импактитов — мегабрекчий, массивы которой залегают в более внутренних областях астроблемы. Качественный переход к мегабрекчии состоит в том, что промежуточные образования представлены разнообразными по величине обломками и фрагментами пород мишени, так что выбранная граница размерности клиппенов (более 100 м) и глыб мегабрекчии (менее 100 м) становится условной. Количественный переход заключается в том, что доля клиппенов сокращается, а доля связующей массы блоков, представленной мегабрекчией, возрастает. Оба типа переходов обычно проявляются совместно.

Состав связующей массы клиппенов в направлении к центру кратера меняется. Обычно в роли этой массы выступают растащеп-

ные продукты дробления, литологически однотипные с породами контактирующих блоков. Однако постепенно к составу связующей массы начинает добавляться, сначала отдельными телами, а затем и как доминирующий компонент этой массы, фация мегабрекчий с пестрым составом обломков и переменным количеством импактного стекла. Наконец в составе связующей массы клипшенов появляются неправильные струйчатые тела тагамитов и спекшихся импактных брекчий.

Клипшеновая брекция и мегабрекция в целом составляют периферийное кольцо образований, на которые налагаются спекшаяся толща тагамитов, донных импактных брекчий и отложения зювитов, выполняющие центральную область астроблемы. Детальная характеристика донных импактных брекчий и тагамитов, которые совместно с мегабрекциями и клипшенами составляют отложения центробежного донного потока, и зювитов (отложений взрывного облака) дана в работах [2, 6, 8 и др.], и на ней мы останавливаться не будем. Отметим лишь особенности взаимоотношения указанных фаций с клипшенами: 1) уже упомянутое участие тагамитов и сваренных донных брекчий в составе связующей массы клипшенов; 2) залегание зювитов на клипшенах и в промежутках между ними, а также перекрывающее положение спекшихся толщ донных фаций по отношению к этим зювитам, что можно наблюдать на периферии астроблемы (бассейн р. Буордах и другие пункты). Такие взаимоотношения связывают в единый, практически одноактный цикл отложение всех перечисленных импактных фаций, но вместе с тем позволяют сделать некоторые заключения о временной последовательности отложения этих импактитов на периферии кратера, к чему мы еще вернемся.

Интерпретация структурного сочленения зоны клипшенов со слабовозмущенными породами обрамления кратера в работах [1, 6—8] основывалась на представлениях о том, что клипшеновые дислокации полого выклиниваются к краю астроблемы, подстилаемые недеформированными или слабodeформированными породами мишеней, которые уже не относятся к аутигенной брекции. Материалы данной работы позволяют иначе представить глубинное строение краевой части Попигайской астроблемы и механизм затухающего импактирования при взрыве большого масштаба на двухслойной мишени.

Основанием для такого пересмотра послужили особые геологические тела и дислокации, наблюдаемые в краевой части Попигайской астроблемы и в ее ближайшем обрамлении, где эти структуры выглядят наиболее контрастно, так как расположены среди субгоризонтально залегающих пород. Указанные тела и дислокации в той или иной форме описаны многими исследователями (в том числе и автором в диссертационной работе). Однако такие структуры либо получили ошибочную интерпретацию, либо их особое положение не привлекло внимания. В основу предлагаемой работы легли полевые наблюдения, выполненные нами в 1982 г. Среди указанных необычных структур выделяются брекчиевые тела, горсты и участки площадных дислокаций.

**Брекчиевые тела.** Изолированные массивы мегабрекчии, удаленные на 15—20 км за пределы зоны клипшенов, широко распространены в обрамлении Попигайской астроблемы, что отражено на геологической карте, опубликованной в работе [6]. Эти изолированные массивы мегабрекчии рассматриваются как реликты-останцы некогда сплошного покрова дальних выбросов аллогенного материала, уцелевшие от эрозии. Нами изучено три таких массива в северо-западном и западном секторах обрамления кратера: Эдьен-Юрэгский, Пастахский и Тумул-Юрэхский.

Эдьен-Юрэгский массив (точки наблюдения 1822—1830) расположен в долине р. Эдьен-Юрэг (левый приток Попигая), обнажаясь по обоим бортам этой долины. Массив брекчии залегает в субгоризонтальных толщах пород кембрия, которые содержат послойные и секущие интрузии раннетриасовых долеритов. Размер тела брекчии 1,4 на 2,8 км, причем длинная ось тела вытянута вдоль долины реки по азимуту 290—295° согласно с направлением региональной системы древних доимпактных разломов, превосходно отдешифрованных в обрамлении. Видимая мощность тела брекчии 50—60 м. Судя по профилю поперечного сечения вкост долины Эдьен-Юрэг, тело имеет воронкообразную форму, уходя в толщу осадочных пород подобно трубке. Контакты со вмещающими породами, прослеженные на отдельных участках, крутопадающие. Вмещающие породы южного, западного и северо-западного флангов этого тела разбиты на серию блоков, наиболее крупные из которых имеют размеры около 1 км. В пределах самого тела брекчии залегают пять рассеянных в его объеме клипшенов карбонатных пород кембрия; самый крупный из них имеет поперечник до 400 м (рис. 1). Тело сложено мегабрекчией, обломки которой состоят из карбонатных пород кембрия, триасовых долеритов и архейских гнейсов; в подчиненном количестве встречаются глыбы мукунских кварцитопесчаников. При этом наиболее крупные глыбы архейских и других пород достигают 100 м

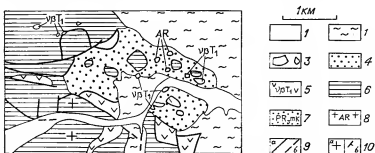


Рис. 1. Схематическое геологическое строение Эдьен-Юрэгской диа-тремы.

1 — современные отложения; 2 — средне- и верхнечетвертичные отложения; 3 — клипшены пород мишени; 4 — мегабрекчии; 5 — долериты раннего триаса; 6 — карбонатные породы кембрия; 7 — протерозойские кварцитопесчаники; 8 — архейские кристаллические породы фундамента; 9 — разрывные нарушения отдешифрованные (а) и предполагаемые (б); 10 — залегание осадочных толщ субгоризонтальное (а) и наклонное (б).

в поперечнике, т. е. по размерности приближаются к рангу клипенов. Связующая масса мегабрекчии состоит из продуктов более мелкого дробления этих же пород, имеющих псефито-псаммитовую размерность, но не содержит примеси расплавленного импактного материала. Макропризнаки ударного метаморфизма пород в обломках мегабрекчии представлены интенсивной объемной трещиноватостью, а кое-где — брекчией «грис». Последняя особенно характерна для доломитов и кварцитопесчаников. Микроскопические признаки ударного метаморфизма в минералах гнейсов не обнаружены.

Пастахский массив (точки наблюдения 2130—2143) — самое удаленное среди обследованных тело брекчии, расположенное на расстоянии 7 км от внешней границы зоны клипенов. Массив брекчии залегает в субгоризонтальной толще мукунских кварцитопесчаников протерозоя, которые выше по разрезу сменяются карбонатными породами кембрия мощностью до 100 м, слагающими участки водоразделов. Массив имеет продолговатую форму размером  $1,7 \times 3,5$  км и вытянут по азимуту  $295-300^\circ$ , т. е. согласно с направлением одной из главных доимпактных систем разломов, развитых в районе. К массиву брекчий и его юго-западному обрамлению приурочена депрессия рельефа глубиной до 120 м, днище и склоны которой заняты бассейном руч. Пастах (правый приток р. Рассоха). Массив брекчий с крутым до вертикального контактом залегает в толщах протерозоя и кембрия, которые в его обрамлении разбиты на блоки различной величины (со следами перекоса и вертикальных движений разного знака и амплитуды) вплоть до 30 м и более относительно смещения по вертикали в контактах смежных фрагментов. Наиболее крупные из таких блоков достигают 1 км в поперечнике. В самом теле брекчий залегает несколько блоков-клипенов карбонатных пород и кварцитопесчаников, наибольший из которых достигает 700 м в поперечном сечении (рис. 2). В меридиональном разрезе тело брекчий имеет форму жерла или трубки, уходящей на глубину, а видимая

мощность этого тела, вскрытая в долине ручья, составляет 80—90 м.

Тело сложено мегабрекчией, обломки которой состоят из карбонатных пород кембрия, кварцитопесчаников протерозоя, архейских гнейсов и раннетриасовых долеритов. По величине эти обломки,

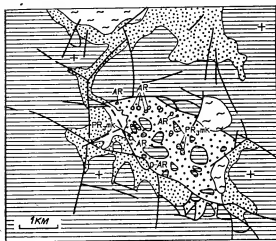


Рис. 2. Схематическое геологическое строение Пастахской диатремы. Усл. обозн. см. на рис. 1.



включая и глыбы архейских гнейсов, разнообразны — от первых до 100 м, т. е. переходят в ранг клипшен. Связующая масса мегабрекчий и клипшенов Пастахского массива представлена более мелко-раздробленным материалом этих же пород, обломки которых имеют псефито-псаммитовую размерность. Примеси расплавленного компонента в связующей массе брекчий нет. Макроскопические следы ударного метаморфизма в глыбах пород ограничены интенсивной объемной трещиноватостью и брекчиями «грис». Последние локально распространены в карбонатных породах и кварцитопесчаниках. По устному сообщению А. Н. Бабкина, в обломках карбонатных пород массива Г. М. Лопатин обнаружил конусы разрушения. Петрографических признаков ударного метаморфизма в минералах гнейсов из обломков брекчий не обнаружено.

Тумул-Юрэхский массив (точки наблюдения 1527—1537) расположен в бассейне одного из левых притоков руч. Тумул-Юрэх и представляет собой «висячую залежь» на восточном склоне холма, сложенного карбонатными породами кембрия. Эти породы вскрываются и выше, и ниже по склону относительно «залежи» брекчий. Далее к востоку, уже на противоположном склоне долины притока, начинаются чередующиеся выходы кембрийских и протерозойских пород чехла, относящиеся к внешнему краю зоны клипшенов Попи-гайской астроблемы. Видимая мощность «залежи» брекчий составляет 40—50 м. «Залежь» сложена мегабрекчией, отдельные наиболее крупные глыбы и пластины пород мишени в которой достигают нескольких десятков метров в поперечнике. Среди глыб мегабрекчий отмечены все известные разности пород мишени, включая обломки мезозойских тонкослоистых терригенных пород с конкрециями. Цемент глыб мегабрекчий состоит из псефито-псаммитовых продуктов дробления перечисленных пород с переменным количеством импактного стекла. На отдельных участках в составе цемента встречаются линзы и неправильные струйчатые массы богатых стеклом туфовидных брекчий и даже тагамитов. В крупных глыбах мегабрекчий, среди которых есть и блоки архейских гнейсов, отмечена интенсивная объемная трещиноватость, а по карбонатным породам и кварцитопесчаникам встречаются локально развитые брекчий «грис». В мелких обломках гнейсов из связующей массы наблюдается богатая палитра разнообразных ударно-метаморфических изменений минералов, вплоть до появления диаплектических кварцевых стекол и лешательерита.

Мегабрекчий Тумул-Юрэхского массива являются типичными представителями отложений центробежного донного потока и могут рассматриваться как реликт покрова закратерных выбросов, залегающий на породах обрамления. Что касается Пастахского и Эдьен-Юрэгского массивов мегабрекчий, то их геологическая позиция и происхождение представляются иными. От реликтовых остатков покрова закратерных выбросов их отличает следующее:

— положение в рельефе (приурочены не к пологим водоразделам, а к депрессиям рельефа глубиной до 120 м, разрабатываемым гидросетью);

— воронко- или трубкообразная морфология тел, секущие крутые контакты с породами рамы, в которых брекчии прослеживаются на глубину до 90 м и более;

— блоковые дислокации вмещающих пород; при этом отдельные клиппены этих пород захвачены мегабрекчией и цементируются ею;

— низкоамплитудный ударный метаморфизм брекчированных пород и отсутствие расплавленного компонента, что для типичных мегабрекчий центрбежного донного потока не характерно;

— отсутствие обломков мезозойских осадочных пород, но в то же время широкое распространение глыб раннетриасовых долеритов, что также нехарактерно для типичных мегабрекчий центрбежного донного потока, доставленных из внутренней области астроблемы.

По перечисленным особенностям Эдьен-Юрэгское и Пастахское брекчиевые тела интерпретируются как диатремные прорывы снизу. По присутствию гнейсов в составе брекчий минимальная глубина, на которую простираются Пастахская и Эдьен-Юрэгская диатремы, может быть оценена глубиной залегания кровли кристаллического фундамента и составляет соответственно 600 и 1000 м.

Признаки хотя и слабого, но достоверного ударного метаморфизма пород в обломках брекчий указывают, что оба названных тела имеют общее происхождение с Попигайской астроблемой. Поэтому Пастахское и Эдьен-Юрэгское тела рассматриваются нами как импактные диатремы, т. е. структуры, образованные одновременно с Попигайской астроблемой вследствие быстрых восходящих субвертикальных движений, в результате которых большие массы деформированных пород были доставлены к дневной поверхности из глубинных горизонтов разреза мишени. Отметим, что такие движения осуществлялись локально.

Эдьен-Юрэгская и Пастахская импактные диатремы не единственные тела такого рода в слабодислоцированном осадочном обрамлении Попигайской астроблемы. К достоверно секущим брекчиевым трубкам можно отнести серию воронкообразных тел «туфов», описанных А. И. Трухалевым и М. М. Поляковым [11] в доломитах кембрия к юго-востоку от астроблемы, на расстоянии до 8—10 км от борта последней. Эти тела имеют диаметр до 20 м и четкие субвертикальные контакты с вмещающей породой. Зеленовато-серые «туфы», которыми сложены тела, содержат обломки архейских гнейсов, протерозойских песчаников и доломитов кембрия. Степень ударного метаморфизма минералов архейских пород в этих брекчиях также низка (планарные трещины в кварце, побурение и снижение двупреломления последнего, изменения в биотите). Авторы [11] подчеркивают, что по макро- и микроскопическим особенностям «туфы» указанных воронкообразных тел аналогичны соответствующим разностям пород в Попигайской астроблеме. Ценность такого заключения несколько не уменьшается тем, что саму астроблему авторы [11] рассматривают как вулканотектоническую структуру. Судя по обломкам гнейсов, глубина заложения импактных диатрем, описанных А. И. Трухалевым и М. М. Поляковым, составляет не менее 500 м.

Импактные диатремы развиты не только в обрамлении Попигай-

ской астроблемы, но, вероятно, и в зоне клиппенов. Естественно, что на фоне клиппеновых движений специфика импактных диатрем в той или иной мере затухает и не проявляется столь отчетливо, как у брекчиевых тел в слабодислоцированных породах обрамления. К таким внутрикратерным импактным диатремам, вероятно, можно отнести компактные массы мегабрекчии, богатые обломками и блоками архейских пород, которые неожиданно появляются среди монотонного чередования клиппенов исключительно осадочных пород, цементированных мелкообломочными продуктами дробления контактирующих блоков. В этих же массах мегабрекчии появляются обломки триасовых долеритов, обычно довольно редкие среди других импактитов астроблемы. Ударный метаморфизм пород и в пределах самого такого тела мегабрекчии, и в окружающем поле клиппенов либо слабый (интенсивная трещиноватость, брекчии «грис», зоны милонитизации и дробления), либо вовсе не выражен, а примесь расплавленного импактного материала отсутствует. Маловероятно, что такие массы мегабрекчии доставлены центробежным доинным потоком из внутренней области кратера. Гораздо логичнее, основываясь на присутствии импактных диатрем в обрамлении, предполагать, что описываемая брекчия имеет местное происхождение и доставлена с глубины в результате субвертикальных восходящих прорывов. Примерами возможных импактных диатрем среди пояса клиппеновых блоков астроблемы могут быть брекчии архейских гнейсов в районе р. Юрюнг-Чочура (точки наблюдения 1896—1907), в бассейне среднего течения р. Саха-Юрэгэ (точки наблюдения 479—481) и в других пунктах. Механизм образования импактных диатрем, который будет рассмотрен ниже, удовлетворительно объясняет их присутствие не только в обрамлении, но и в зоне клиппенов астроблемы.

**Горсты.** Дислокации этого типа, по-видимому, широко развиты в осадочном обрамлении и в пределах зоны клиппенов Попигаийской астроблемы. В северо-западном и западном секторах обрамления и краевой части кратера изучались Тумул-Юрэхский горст и Лево-Рассохинская группа горстов (обрамление кратера), а также Право-Рассохинский горст (зона клиппенов).

Тумул-Юрэхский горст (точки наблюдения 1538—1540) — это блок мукунских кварцитопесчаников размером  $0,7 \times 2,4$  км, который обнажается на правом склоне одного из притоков руч. Тумул-Юрэх среди субгоризонтально залегающих кембрийских толщ. На вершине блока также сохранилась «шляпа» карбонатных пород кембрия. Контакты блока со вмещающими породами (там, где они прослежены) крутые до вертикальных. Почти прямоугольная форма блока контролируется двумя системами регионально развитых разломов, отдешифрированных во вмещающих породах: субмеридиональной и субширотной. Согласно последней, по азимуту  $287—290^\circ$ , ориентирована и длинная ось блока. Обе системы разломов древние, доимпактного заложения, и часть из них была инъецирована дайками долеритов раннего триаса. Видимая мощность кварцитопесчаников 70—80 м, что позволяет соответствующим образом оценить минимальную амплитуду подъема блока. Из макропризнаков ударного метаморфиз-

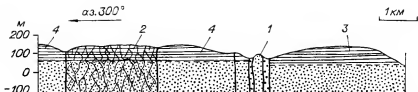


Рис. 3. Сочленение зоны клипменов и обрамления Попигайской астроблемы в породах чехла (район Лево-Рассохинской группы горстов протерозойских кварцитопесчаников).

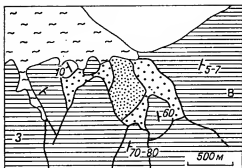
Структурные элементы: 1 — зона дробления и один из горстов отмеченной группы; 2 — участок площадных дислокаций; 3 — крупный клиппен осадочной толщи, размером  $2 \times 3$  км; 4 — слабовозмущенные породы обрамления. Усл. обозн. см. на рис. 1.

ма в породах блока отмечена интенсивная объемная трещиноватость.

Лево-Рассохинская группа горстов (точки наблюдения 1508—1521, 1544, 1545). В левом борту долины р. Рассоха на контакте с горизонтальными толщами карбонатных пород кембрия, относящихся уже к обрамлению кратера, располагаются два крупных клиппена этих же пород. В южном клиппене, размеры которого  $2 \times 3$  км, кембрийские породы залегают субгоризонтально; в северном клиппене ( $1,9 \times 2,8$  км) слои этих пород полого наклонены к центру астроблемы. Между отмеченными клиппенами и обрамлением, протягиваясь на 4 км к северо-востоку вдоль борта кратера, расположена зона дробления шириной до 700 м. В пределах этой зоны находятся три клиппена мукунских кварцитопесчаников, размером от 300 до 550 м; остальная часть зоны либо сложена мегабрекчией кварцитопесчаников и карбонатных пород, либо задренована. Самый южный из клиппенов кварцитопесчаников, располагающийся на склоне долины р. Рассоха, морфологически выражен в рельефе как столовый холм с плоской вершиной, который возвышается над вмещающими карбонатными породами кембрия на 30—40 м (рис. 3). Два других клиппена выражены в рельефе менее отчетливо. Воздымание блоков по отношению к вмещающим карбонатным породам кембрия позволяет рассматривать их как горсты. Минимальная амплитуда подъема горстов оценивается приведенной выше видимой мощностью кварцитопесчаников (30—40 м); реально же амплитуда, с учетом эрозийного среза вершины блоков и неизвестной глубины залегания кровли кварцитопесчаников в боковых толщах, может быть гораздо большей. Следы ударного метаморфизма пород в горстах представлены интенсивной объемной трещиноватостью и локально развитыми жилами брекчий «грис».

Право-Рассохинский горст (точки наблюдения 1493—1495). В правом борту долины р. Рассоха, в 6 км к западу от устья р. Саха-Юрагз, обнажена серия клиппенов осадочных пород чехла. Основные геологические структуры данного участка — западный ( $1,8 \times 2,9$  км) и восточный ( $1,7 \times 2,4$  км) клиппены карбонатных пород кембрия. В этих клиппенах слои осадочных пород полого наклонены к югу и юго-востоку. Между двумя такими крупными клиппенами расположена зона дислокаций, состоящая из серии более мелких,

Рис. 4. Право-Рассохинский горст протерозойских кварцитопесчаников и сопутствующая зона дислокаций, расположенная между западным (З) и восточным (В) клиппенами крупных пород чехла. Усл. обозн. см. на рис. 1.



хаотично ориентированных фрагментов карбонатной толщи, вплоть до блоков с поставленными «на голову» слоями. Связующая масса представлена мегабрекчией пород чехла. Ширина зоны до 1,5 км

(рис. 4). В пределах зоны залегает блок мукунских кварцитопесчаников, размером 400 на 660 м, с видимой мощностью до 100 м. Минимальная амплитуда вертикального подъема блока составляет 120 м относительно восточного клиппена карбонатных пород. Общее положение блока позволяет рассматривать его как горст. Кварцитопесчаники этого горста содержат следы слабого ударного метаморфизма: интенсивную объемную трещиноватость и брекчии «грис».

Горсты занимают особое положение среди дислокаций осадочных пород в зоне клиппенов. В этой зоне широко распространены надвиги, взбросонадвиги и перекосы клиппенов, которые вынесли на один и тот же гилсометрический уровень разновозрастные фрагменты геологического разреза, о чем уже говорилось. На фоне указанных структур выделяются горсты, как результат вертикальных восходящих движений блоков. Вопрос состоит в том, являются ли горсты зоны клиппенов и обрамления сингенетичными по отношению к Попигайской астроблеме. Существование импактных диатрем (восходящих вертикальных движений материала в краевой части астроблемы) и ассоциация с клиппенами позволяют считать, хотя и с определенной долей условности, что такие горсты являются импактными структурами, т. е. возникли на стадии экскавации астроблемы. Доля условности вытекает из того, что горсты могли образоваться и в течение постимпактной геологической истории астроблемы. Если принять импактное происхождение горстов, то наряду с охарактеризованными диатремами они подтверждают, что экскавация материала в краевой части астроблемы в локальных участках сопровождалась подъемом к поверхности деформированных пород мишени из достаточно глубоких горизонтов разреза.

**Участок площадных дислокаций в обрамлении.** За пределами зоны клиппенов, в бассейне руч. Тихого (левый приток р. Рассоха) по данным дешифрирования выделен изолированный участок площадных дислокаций (см. рис. 3). Он имеет удлиненную неправильную форму размером 2,8×5 км, с направлением длинной оси по азимуту 50—55°, т. е. примерно вдоль борта астроблемы в данном секторе. Карбонатные породы кембрия в пределах участка расчленены на глыбы и блоки размером от 100 до 700 м с разупорядоченным залеганием.

нием пластов от фрагмента к фрагменту. Сведения о составе связующей массы блоков и степени ударного метаморфизма пород отсутствуют. Возможно, в связующей массе блоков имеются изолированные тела брекчий, подобные охарактеризованным выше диатремам, и выявление таких тел — задача будущих исследований.

Заканчивая характеристику необычных тел и дислокаций в обрамлении и краевой части Попигайской астроблемы, отметим, что степень ударного метаморфизма пород, вовлеченных в такие перемещения, всегда выше, чем в прорываемых ими толщах. Особенно контрастны такие различия при сопоставлении импактных диатрем с вмещающими породами в обрамлении кратера.

Формирование сопутствующих диатрем и горстов, причем не только в краевой части кратера, но и в его обрамлении, на первый взгляд противоречит представлениям об импактном происхождении Попигайской структуры и согласуется с вулканотектонической гипотезой. В рамках последней импактные диатремы хорошо объясняются как сателлитные вулканические аппараты, о чем уже говорилось в работе [11] и других публикациях, посвященных эндогенному происхождению Попигайской структуры. Импактные горсты, в свою очередь, хорошо вписываются в кальдерный механизм, как обычные сопутствующие тектонические структуры краевой зоны. Ниже мы попытаемся объяснить происхождение названных диатрем, горстов и площадных дислокаций в рамках импактной гипотезы, а также коснемся некоторых следствий, вытекающих из такого заключения.

Экспкавация импактных кратеров обусловлена особым движением грунта в поле динамических напряжений, которые создаются в породах мишени при ударе космического объекта. Импульсы движения на выброс возникают при взаимодействии ударной волны, созданной упавшим телом, с волнами разгрузки. Механика образования воронок под действием ядерных и массовых химических взрывов достаточно хорошо изучена.

Импактный процесс не является полной аналогией таких взрывов, поскольку энергия передается в мишень в случае удара на некотором отрезке торможения метеорита, а в случае взрыва — из точечного фиксированного источника. Однако сравнительные эксперименты [20 и др.] показали, что некоторое заглубление заряда позволяет получить морфологическое сходство импактных и взрывных кратеров, т. е. при этом достигается подобие основных кратерообразующих процессов. По данным [20], наилучшее сходство взрывных и импактных кратеров достигалось, когда приведенная глубина обычного взрыва составляла  $0,1 \text{ м/кг}^{1/3}$ . В других моделях и расчетах [19, 22] были получены более высокие значения приведенной глубины взрыва для импактного процесса, если сравнивать его с ядерными и химическими взрывами по принципу энергетического подобия. Например, по данным [19], приведенная глубина импактных взрывов колеблется от 0,21 до  $0,56 \text{ м/кг}^{1/3}$ , в зависимости от разных вещественных типов метеорита и мишени, а также от скорости соударения. Эти различия показывают, что импактные «взрывы» характеризуются определенным диапазоном глубины заложения.

Вывод о тождественности импактных процессов с обычными взрывами определенной глубины заложения широко используется в теории импактного кратерообразования. Часто применяются в качестве модельной основы для расшифровки механизмов импактного кратерообразования и данные о распространении и затухании ударных волн в грунтах, полученные при изучении искусственных взрывов. Оценки разного рода, полученные при таких сопоставлениях, позволяют получить хорошее согласование эмпирических наблюдений по астроблемам с результатами экспериментов и расчетов. В интерпретации механизма образования импактных диатрем и горстов Попигайской астроблемы мы также используем принцип аналогии импактного процесса и взрыва, однако отметим, что в силу большого масштабного несоответствия полученные при этом заключения носят качественный, наглядный характер.

Д. Гаулт [17], который проводил маломасштабные лабораторные эксперименты по моделированию процессов импактного кратерообразования, представлял каждую мгновенную поверхность фронта ударной волны как правильную полусферическую изобарическую поверхность с определенной амплитудой ударного давления, а затухание ударной волны принимал одинаковым во всех направлениях. Механизм экскавации, созданный на основе такой модели распространения ударной волны, хорошо объясняет возникновение перемещающих течений в возмущенном грунте и его движение на выброс, направленное по пологим (центробежный донный поток) и крутым (султан выбросов взрывного облака) траекториям из внутренней области растущего кратера. С помощью механизма Д. Гаулта удовлетворительно объясняются \* такие основные черты фактической геологии Попигайской астроблемы, как взаимоотношение, состав и структура главных фаций коптогенного комплекса, способ их транспортировки и отложения, возникновение обратной «стратиграфической» зональности в импактитах краевой части кратера и другие особенности. Однако объяснить образование импактных диатрем и горстов в краевой части, а тем более в обрамлении астроблемы механизм Д. Гаулта не может. Не в состоянии он объяснить и некоторые особенности состава и структуры импактных фаций. Среди них можно отметить обилие обломков меловых осадочных пород (от псефито-псаммитовой размерности до крупных глыб) в зювитах центральной части Попигайской астроблемы. К объяснению этого мы еще вернемся.

Обратимся к результатам наблюдений и расчетов, полученных при крупномасштабных взрывах в плотных породах. Такие породы аналогичны мишени Попигайского кратера и наилучшим образом имитируют условия его формирования. По данным, приведенным в работах [1, 10, 12 и др.], отмечается, что процесс распространения

---

\* Следует учесть поправку на искажающее влияние таких факторов, как быстрое выдвигание сингенетического вала архейских гнейсов во внутренней области астроблемы, действие различных постимпактных процессов типа оползней, внедрения импактного расплава и т. д., в результате чего на поздних стадиях процесса экскавации и в течение постударной эволюции кратера происходило перераспределение аллогенного материала.

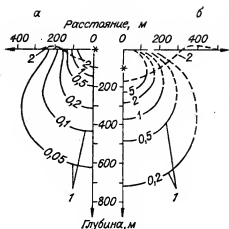


Рис. 5. Влияние свободной поверхности на затухание ударной волны при ядерном взрыве в плотных породах, по данным [16].

а — приповерхностный взрыв, глубина заложения 3 м; б — взрыв с глубиной заложения 100 м. Мощность каждого взрыва 1 Мт тротилового эквивалента, приведенная глубина 0,003 и 0,1 м/кг<sup>1/3</sup> соответственно. 1 — изобары ударной волны, давления указаны в ГПа; 2 — линия дна образованного кратера.

и затухания ударных волн при взрывах поверхностных и мало-заглубленных зарядов (энергетическое подобие импактных «взрывов») в плотных породах зависит от расстояния до источника энергии (рис. 5). В

ближней области (давления ударной волны более 1 ГПа для взрыва на поверхности и более 2—5 ГПа для заглубленного взрыва) затухание ударной волны характеризуется тем, что ее изобары имеют правильную сферическую форму и концентричны. Такое затухание согласуется с моделью Д. Гаулта, и можно считать, что в данной области действует соответствующий механизм экскавации кратера. Затухание ударной волны в дальней области (давления ниже указанных пределов, см. рис. 5) изменяется и характеризуется тем, что изобары этой волны в некотором шаровом секторе под эпицентром взрыва начинают выгибаться в глубину за счет того, что в приповерхностном секторе грунта затухание шло гораздо сильнее. Поэтому в дальней области затухания, которая соответствует краевой зоне и ближнему обрамлению будущего кратера, степень ударного нагружения грунта неодинакова и нарастает с глубиной, если двигаться от поверхности по вертикали. Следовательно, в дальней области затухания, под влиянием свободной поверхности, давление на фронте ударной волны становится неодинаковым и распределено так, что максимальные его значения приходится на участок фронта под эпицентром взрыва, в то время как в направлении к свободной поверхности амплитуда волны снижается. Иллюстрацией этого могут быть не только данные рис. 5, но и расчеты [10], обобщения [12] и другие результаты.

Отметим, что в дальней области затухания ударная волна распространяется в двухфронтальном режиме, распадаясь на упругий предвестник и пластическую составляющую. Фронт упругого предвестника движется со скоростью звука и имеет амплитуду ударного давления, соответствующую динамическому пределу упругости для данной породы. Пластическая волна обладает более высоким ударным давлением, но движется медленнее, чем упругий предвестник. Амплитуда последнего находится в зависимости от давлений в пластической волне. Сведения о скоростях и амплитудах упругого предвестника и пластической волны для разных пород земной коры при-



ведены в работе [15], материалами которой мы воспользуемся. Исходя из закона сохранения импульса, можно отметить, что чем больше амплитуда ударной волны (при одной и той же начальной плотности грунта), тем выше массовая скорость движения вещества за фронтом этой волны и скорость распространения самого фронта. Следовательно, по данным рис. 5, в приповерхностном секторе грунта не только снижается амплитуда достаточно отошедшей ударной волны, но и отстает фронт ее пластической составляющей. Ниже, при характеристике того влияния, которое оказало на режим распространения ударной волны двучленное строение разреза мишени, будет показано, что в Попигайском импактном процессе также наблюдалось и приповерхностное отставание фронта упругого предвестника, связанное с различными физическими свойствами пород мишени.

Приповерхностное снижение амплитуды и скорости пластической составляющей ударной волны, которое происходит в дальней области затухания искусственных взрывов, можно в полной мере распространить на особенности затухания ударной волны в импактных процессах. Однако, прежде чем экстраполировать эти особенности на случай Попигайского импактного процесса, отметим, что конкретная величина амплитуды ударной волны, при которой уже проявляется отмеченное выше влияние свободной поверхности, меняется в зависимости от глубины взрыва и различна даже для мишени из одних и тех же пород (см. рис. 5). Глубина проникновения метеорита в грунт в тот момент, когда он передает мишени всю свою кинетическую энергию (глубина импактного «взрыва»), по данным [19], сильно зависит от скорости и плотности этого метеорита, а также от плотности пород мишени. При этом наименьшая глубина проникновения в грунт будет наблюдаться при ударе ледяного метеорита в плотную мишень. Для Попигайской астроблемы ни скорость, ни плотность упавшего тела пока неизвестны, и выбрать в качестве аналога экспериментальный взрыв с конкретной приведенной глубиной заложения не представляется возможным. Поэтому для наших целей будет использоваться лишь достаточно общее утверждение о том, что при Попигайском импактном процессе на периферии будущей астроблемы имело место приповерхностное снижение амплитуды и скорости фронта пластической ударной волны. Интересно отметить, что в пористых, малоплотных породах картина приповерхностного затухания достаточно отошедшей ударной волны меняется в зависимости от глубины заложения заряда так сильно [16], что для взрыва в приповерхностных условиях приближается к интерпретации по Д. Гаулту. Однако к Попигайской астроблеме, заложенной в плотных породах, данная модель не подходит.

Немаловажный фактор, повлиявший на режим приповерхностного распространения не только пластической составляющей, но и упругого предвестника ударной волны, — двучленное строение мишени, на которой заложена астроблема. Породы чехла и кристаллического фундамента, слагающие эту мишень, имеют различную плотность. Так, по данным [8], архейские гнейсы Анабарского щита имеют среднюю плотность  $2,83 \text{ г/см}^3$ , а породы осадочного чехла —

2,51 г/см<sup>3</sup> (протерозойские кварцитопесчаники), 2,67 г/см<sup>3</sup> (карбонатные породы кембрия) и 2,23 г/см<sup>3</sup> (пермские терригенные отложения). Конкретные значения скоростей продольных волн в этих породах автору неизвестны, однако по аналогии со среднестатистическими справочными данными [13] по указанным типам пород можно считать, что скорости продольных волн и акустические импедансы пород чехла, даже карбонатных, заметно меньше, чем у пород фундамента. Соответственно в верхних горизонтах разреза мишени, сложенных осадочными породами, происходило отставание фронта упругого предвестника, все более нараставшее к поверхности, по мере перехода во все более рыхлые слои отложений. Обращаясь к данным работы [15], следует отметить, что максимальные давления на фронте упругого предвестника в гнейсах могли достигать 4—9 ГПа, в карбонатных породах кембрия — 0,5—1,5 ГПа, а в рыхлых терригенных отложениях перми и мезозоя — от 0,4 до 0,8 ГПа. Таким образом, в верхних горизонтах разреза мишени Попигайского кратера происходило не только отставание фронта упругого предвестника, но и снижение его амплитуды. Приповерхностное отставание фронта и снижение амплитуды ударной волны (включая и упругий предвестник, и пластическую составляющую) соответственным образом отразилось на механизме экскавации астроблемы.

Геометрия поля динамических напряжений, созданного ударной волной (здесь и далее в целях упрощения действие этой волны рассматривается по совокупному вкладу обоих компонентов без разделения на упругую и пластическую составляющие) и волнами разгрузки в породах мишени по периферии будущей Попигайской астроблемы, изображена на рис. 6. В схематическом виде показано существенное (под влиянием свободной поверхности и физических свойств пород) отставание фронта ударной волны в толщах чехла, умеренное (под влиянием близко расположенной свободной поверхности) отставание этого фронта в верхних горизонтах кристаллического фундамента и наконец нормальное распространение фронта волны в глубинных горизонтах фундамента. Переменная амплитуда ударной волны, нарастающая с глубиной, схематически показана соответствующим положением изобар этой волны. Результирующее движение элементарного объема возмущенной среды складывалось из вектора массовой скорости  $V_m$  и вектора скорости квазиупругого расширения  $V_e$ , действующих в разных направлениях. Из анализа представленной на рис. 6 реконструкции поля динамических напряжений в породах мишени у краевой части астроблемы можно выделить три области с различным направлением движения на выброс \*, которое приобретает грунт под действием ударной волны и волн разгрузки.

---

\* Здесь и далее под терминами «движение на выброс» и «экскавация» будем понимать не только выброс материала мишени по баллистическим траекториям, но и его смещение без отрыва и своеобразное растекание, которое расширяет границы будущего кратера и увеличивает его объем. О том, что существенная часть объема кратерной воронки возникает за счет движения грунта без отрыва, свидетельствуют эксперименты Д. Гаулта [17] и других авторов. Оче-

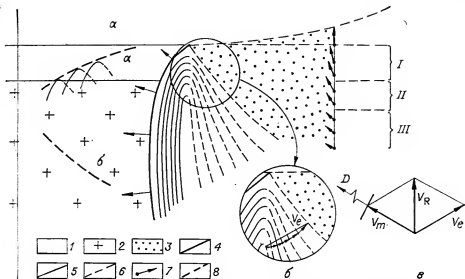


Рис. 6. Распространение ударной волны и схематическое представление процессов экскавации в краевой части Попгайской астроблемы.

$\alpha$  — поле динамических напряжений в породах мишени, созданное ударной волной и волнами разгрузки;  $\beta$  — отклонение вектора скорости квазиупругого расширения сжатого материала мишени;  $\epsilon$  — результирующее движение материала мишени;  $D$  — скорость ударной волны;  $V_m$  — массовая скорость движения частиц за фронтом ударной волны;  $V_e$  — скорость квазиупругого расширения материала мишени в волне разгрузки;  $V_R$  — результирующая скорость движения материала мишени на выброс в процессе экскавации кратера. 1 — породы чехла; 2 — породы фундамента; 3 — возмущенный материал мишени, который начал движение на выброс; 4 — фронт ударной волны; 5 — изобары ударной волны; 6 — изобары волны разгрузки; 7 — распределение вектора скорости результирующего движения на выброс по разрезу мишени и области I, II, III с различным направлением движения на выброс; 8 — ограничение механизма приповерхностной экскавации «сверху» в связи с «погребенным» режимом распространения ударной волны ( $\alpha$ ) и «снизу» по Д. Гаульту ( $\beta$ ).

1. Приповерхностная область в породах чехла. Вектор ударной волны имел заметно восстающее направление, и результирующее движение материала мишени было направлено не только по субвертикальным центробежным траекториям («положительные» выбросы), но и частично по субвертикальным траекториям, наклоненным внутрь кратера («отрицательные» выбросы). За счет выбросов по «отрицательным» траекториям материал из внешних зон отлагался во внутренней области кратерной воронки.

2. Область верхних горизонтов фундамента. Вектор ударной волны был направлен субгоризонтально или с пологим подъемом, результирующее движение материала было направлено по субвертикальным и менее крутым центробежным «положительным» траекториям.

3. Область глубинных горизонтов фундамента. Вектор ударной волны имел наклонное, под разным углом «погружающееся» направ-

видно, в силу таких ограничений, как инерционные свойства и вес вышележащих толщ, не все импульсы движения на выброс, особенно для пород из глубинных горизонтов, могли реализоваться в процессе экскавации кратера.

ление; результирующее движение материала совпадало с направлением действия центробежной силы, с пологим подъемом или субгоризонтально.

Поскольку амплитуда ударной волны от области 1 к области 3 нарастала, соответственно изменялся импульс движения на выброс.

Анализ показывает, что в зависимости от глубины залегания от поверхности и физических свойств пород мишени их движение на периферии будущей Попигайской астроблемы различалось по направлению и по импульсу. Из третьей области и нижних горизонтов второй материал мишени перемещался в соответствии с механизмом Д. Гаулта. Из первой и частично из второй областей материал выбрасывался по крутым восстающим траекториям «положительного» и «отрицательного» направлений. Механизм такого движения, вызванный влиянием свободной поверхности и физических свойств верхних горизонтов мишени, будем называть механизмом приповерхностной экскавации. Совместное действие обоих механизмов привело к формированию краевых структур Попигайской астроблемы.

Смена механизма экскавации по Д. Гаулту, преобладавшего в центральной части будущей астроблемы, на совместное действие обоих механизмов на ее периферии происходила, видимо, постепенно и не одновременно для различных литологических горизонтов мишени. Отставание фронта и усиленное затухание ударной волны в чехле должно было начаться раньше, чем эта волна дошла до периферии астроблемы. Такое искажение поля динамических напряжений «включило» механизм приповерхностной экскавации и привело к выбросу осадочных пород чехла по крутым «положительным» и «отрицательным» траекториям уже в некоторой внутренней области будущего кратера. В этой области механизм приповерхностной экскавации стал действовать сначала в самых верхних горизонтах осадочных пород. Именно с такими, еще достаточно высокоскоростными, выбросами можно связать появление обильного обломочного материала и даже крупных, поперечником до нескольких десятков метров, глыб малонарушенных слоистых меловых пород среди некоторых зювитов центральной части астроблемы [4] \*, о чем мы уже упоминали выше. Обломки этих пород были подняты на большую высоту, внесли искажения в структуру облака «поздних» зювитов и осели в основном в пределах внутренней части астроблемы. Осадочные породы из более глубоких горизонтов разреза, где механизм приповерхностной экскавации еще не действовал или включился частично, перемещались в составе центробежного донного потока, подхваченные последним после того, как были невысоко подброшены и осели в дви-

---

\* Изложенные в работе [4] представления о приповерхностном и центральном секторах слабого и сильного (соответственно) импактирования пород получают дальнейшее развитие на основе реконструкции поля динамических напряжений в мишени попигайского взрыва. Слабый ударный метаморфизм меловых и других осадочных пород в обломках из зювитов центральной части астроблемы теперь объясняется не только кратковременностью действия, но и снижением амплитуды ударной волны под влиянием свободной поверхности и повышенной плотности осадочных пород.

жущийся материал этого потока. Как следует из геологических данных, в общем объеме материала, мобилизованного во внутренней области кратера и вынесенного на его периферию, доля осадочных пород (а следовательно, и сфера действия механизма приповерхностной экскавации) незначительна. Поэтому взрывное облако и тыловую часть центробежного донного потока в целом можно охарактеризовать как систему радиальных выбросов по крутым или пологим траекториям, созданную в основном под действием механизма Д. Гаулта.

Что касается внешней части центробежного донного потока и особенно его фронтальной кромки, которая была оставлена в породах обрамления и зафиксировала внешнюю границу астроблемы, то, прежде чем рассматривать роль обоих механизмов экскавации в создании краевых структур, отметим общие особенности затухания ударной волны и процессов экскавации на периферии кратера.

При оценке диаметра кратера согласно модели равномерного затухания ударной волны в полусферическом объеме (и соответственно принимая модель экскавации этого кратера по механизму Д. Гаулта) считают, что профиль кратерного дна в радиальном разрезе первоначально имел параболическую форму, плавно поднимаясь к поверхности у борта воронки. Давления ударной волны в породах мишени на борту будущего кратера оцениваются от 0,2 до 2 ГПа [19]. Если использовать верхний предел оценки таких граничных давлений, то можно прийти к заключению, что упругий предвестник даже максимальной амплитуды, который создавался в карбонатных и терригенно-обломочных породах чехла астроблемы, был недостаточно интенсивен для экскавации этих пород без дополнительного импульса из кристаллического фундамента. В то же время максимальные амплитуды упругого предвестника в гнейсах были вполне достаточны, чтобы вызвать экскавацию кратерной воронки.

Упрощенная модель затухания ударной волны (и экскавация кратера только по механизму Д. Гаулта) в краевой части астроблемы не соблюдается из-за влияния свободной поверхности [19]. Согласно оценке [19], влиянием свободной поверхности на форму изобар ударной волны в импактном процессе можно пренебречь лишь тогда, когда амплитуда этой волны еще не снизилась до уровня 50 ГПа. В нашей реконструкции поля динамических напряжений в краевой части будущей Попигайской астроблемы усиленное приповерхностное затухание ударной волны стимулировалось еще и пониженной плотностью верхних горизонтов мишени. Под влиянием свободной поверхности и двучленного строения разреза мишени ударная волна на периферии будущей астроблемы быстрее затухала в породах чехла, чем в кристаллическом фундаменте. В результате по мере распространения возмущения в породах чехла вначале сформировалась область отхода от поверхности повышенных ударных давлений (пластический компонент), а затем и область полного отхода ударной волны (упругий предвестник), схематически показанная на рис. 6. После отхода от поверхности ударная волна некоторое время распространялась в «погребенном» варианте в породах фундамента и на-

конец угасла в последних, произведя соответствующие нарушения.

Согласно классификации [12], Попигайская астроблема не «прочностный», а «гравитационный» кратер. Ее размеры определялись силой земного тяготения, а следовательно, той скоростью движения на выброс, которую ударная волна и волны разгрузки сообщали возмущенному материалу мишени на периферии этой астроблемы. Как известно, при затухании ударной волны эта скорость сильно убывает. Так, например, только за счет линейного затухания, связанного с распространением ударной волны от центра взрыва, скорость движения выбрасываемого материала убывает в степени большей чем вторая, обратно пропорционально расстоянию [12]. В породах чехла на периферии астроблемы происходило еще большее снижение скорости движения на выброс вследствие усиленного затухания, а затем и отхода ударной волны от поверхности. Внешняя граница Попигайской астроблемы, проведенная по линии сочленения зоны клиппенов со слабовозмущенными породами обрамления, есть тот рубеж, где импульс движения на выброс, полученный породами мишени, стал уравниваться силой тяжести в такой степени, что фрагментации осадочных толщ на клиппены уже не происходило. Однако в результате неравномерного импульса движения на выброс, полученного породами чехла и фундамента, внешняя граница зоны клиппенов определялась не только собственными движениями пород чехла, но и тем воздействием, которое оказывали на них движения кристаллического фундамента. Динамике экскавационного взаимодействия пород чехла и фундамента мы отводим важную роль в создании краевых структур Попигайской астроблемы и образовании ее внешней границы. Эта роль прямо следует из влияния свободной поверхности и двучленного строения мишени на геометрию ударной волны и скорость ее затухания.

Охарактеризуем качественно динамику взаимодействия пород чехла и фундамента на периферии астроблемы. Выше уже говорилось, что движение материала в краевой части центробежного донного потока осуществлялось под действием механизмов Д. Гаулта и приповерхностной экскавации. В вертикальном разрезе переход от одного механизма к другому осуществлялся постепенно. Механизм Д. Гаулта имел ограничение «снизу» (см. рис. 6), которое, как и в модели кратера с равномерным затуханием ударной волны во всех направлениях, может быть представлено некоторой линией, параллельной профилю кратерного дна. Ниже этой линии существенного смещения материала мишени не происходило. Линзовидная область смещений по механизму Д. Гаулта ограничивалась выше по разрезу зоной действия механизма приповерхностной экскавации. Этот механизм, в свою очередь, в краевой части астроблемы имел ограничение «сверху» (см. рис. 6), связанное с отходом достаточно интенсивных ударных давлений от поверхности. При этом сначала утратили собственный импульс движения на выброс верхние горизонты пород чехла, затем нижние, и наконец механизм приповерхностной экскавации был остановлен в кристаллическом фундаменте. Поскольку импульс движения на выброс в нижележа-

щих горизонтах разреза мишени и особенно в породах фундамента по сравнению с чехлом был выше, то и после того, как оба механизма экскавации стали действовать в «погребенном» варианте, взламывание и фрагментация осадочных толщ происходили до тех пор, пока вес и прочностные свойства этих пород не оказались достаточными для сопротивления.

Так в породах чехла была остановлена фронтальная кромка центробежного донного потока и сформировалась внешняя граница зоны клипшенов. Под действием глубинных импульсов, полученных от фундамента, в краевой части зоны клипшенов образовались крупные блоки пород чехла площадью до нескольких квадратных километров, которые, переместившись с малой вертикальной амплитудой, имеют субгоризонтальное или наклонное под малыми углами залегание пластов. Структура краевой части зоны клипшенов указывает, что на фронте центробежного донного потока преобладал механизм приповерхностной экскавации. Вместе с тем даже на границе зоны клипшенов есть крупные блоки осадочных толщ с фес-тончатым или серповидным внешним контуром, которые по надвиго-взбросовому контакту протяженностью до 5—7 км сочленяются вдоль края астроблемы со слабовозмущенными породами обрамления. Центробежное перемещение таких клипшенов, по-видимому, не только связано с соответствующим компонентом движения по механизму приповерхностной экскавации, но может являться отголоском глубинных смещений по механизму Д. Гаулта. Исключительно осадочный состав блоков у дневной поверхности краевой части зоны клипшенов объясняется тем, что вес и прочностные свойства уже инертного при экскавации пояса пород чехла гасили движение кристаллических пород на выброс. Подъем последних на дневную поверхность в краевой части астроблемы осуществлялся в тех исключительных случаях, которых мы коснемся, рассматривая происхождение импактных диатрем и горстов.

Нарастающая к центру кратера фрагментация пород чехла, уменьшение размера клипшенов, хаотичность их нагромождения и появление у дневной поверхности блоков кристаллического фундамента указывают, что в данном направлении быстро увеличивалась мощность процессов перемешивания и выброса под действием механизма приповерхностной экскавации. В этом же направлении растет количество надвиговых дислокаций с появлением многочисленных субгоризонтальных аллоктонов, что свидетельствует о повышении амплитуды центробежного смещения. Параллельно возрастает роль цемента блоков, состоящего из мегабрекчий и других фаций тыловой части донного потока. Наконец, клипшеновая брекчия выше по разрезу сменяется спекшейся толщей образований, в составе которых господствует измененный материал кристаллического фундамента (обратная «стратиграфическая» последовательность отложения). Такая эволюция состава и структуры образований показывает, что в направлении ко внутренней области кратера объем и мощность центробежного донного потока резко увеличи-

лись, а преобладающую роль в движении материала этого потока стал играть механизм экскавации по Д. Гаулту.

«Погребенный» режим распространения ударной волны и соответствующее затухание механизма приповерхностной экскавации в краевой части астроблемы позволяют объяснить образование импактных диатрем и горстов следующим образом. По мере распространения ударной волны на периферии будущей астроблемы создавалась уже упоминавшаяся ситуация, когда толщи осадочных пород в значительной мере или полностью утратили собственный импульс движения на выброс, но под воздействием фундамента продолжали испытывать фрагментацию и блоковые движения все более снижающейся амплитуды. Наконец на рубеже зоны клипшенов и слабодислоцированных пород обрамления астроблемы было достигнуто динамическое равновесие между давлением и прочностными свойствами пород чехла, с одной стороны, и импульсом движения на выброс, полученным из фундамента, — с другой. (Можно предположить, что далее, за пределами зоны клипшенов, по дневной поверхности пород чехла вслед за фронтом ударной волны в гнейсах быстро бежала затухающая волна вертикального вспучивания, которая уже не создавала блоковой фрагментации осадочных толщ.) В условиях затухания приповерхностных движений локальные области разреза пород мишени, ослабленные доимпактной тектоникой, оказались теми «окнами проницаемости», через которые произошло взрывное внедрение брекчий и быстрое выдвигание горстов. Особенно показательны в этом отношении согласная с господствующими системами доимпактных разломов удлиненность диатрем и горстов и обилие в брекчии диатрем обломков пнtruзивных пород триаса, обычно весьма редких среди аллогенных фаций астроблемы. Быстрое выдвигание и взрывоподобное внедрение глубокого материала по механически ослабленным зонам осуществились под действием импульсов, полученных от достаточно интенсивной «погребенной» ударной волны по механизму приповерхностного импактирования. Импактные диатремы и горсты контрастно проявились в обрамлении кратера, но несколько затухеваны движениями блоков в зоне клипшенов. Участок площадных дислокаций среди толщ обрамления объясняется как обширное «окно проницаемости», в пределах которого импульсы из пород фундамента хотя и достигли дневной поверхности, но ограничили блоковой фрагментацией без образования импактных диатрем и горстов.

Важное следствие, которое вытекает из сингенетичности импактных диатрем и горстов с астроблемой и согласуется с предложенным механизмом образования этих структур, состоит в том, что тела импактных диатрем и горстов маркируют границу распространения достаточно интенсивной «погребенной» ударной волны на расстояние до 5—7 км за видимый борт астроблемы. Тем самым определяется, что зона аутигенной брекчии, т. е. структура астроблемы, развита в кристаллических породах гораздо шире, чем в породах чехла. По петрографическим данным (отсутствие планарных элементов в кварце и полевых шпатах), ударные давления, испы-



таные гнейсами в брекчии Эджен-Юрэгской и Пастахской диатрем, а следовательно, и породами кристаллического фундамента, которые залегают под чехлом за пределами видимого борта кратера, не превышали уровня 3,5—5,5 ГПа (по данным [21] и [18] соответственно). Уровнем не более чем 3,5—7 ГПа можно оценить давление ударной волны при образовании конусов разрушения в карбонатных породах кембрия из брекчий Пастахской диатремы (если проводить аналогии с условиями образования конусов в осадочных породах Карской астроблемы по данным [3]). Указанный уровень импульсных давлений можно принять в качестве амплитуды «погребенной» ударной волны при образовании импактных диатрем и горстов.

В свете вышеизложенного глубинное строение краевой части Попигайской астроблемы в отличие от работ [1, 6] истолковывается принципиально по-иному (рис. 7). Вместо непонятной зоны приповерхностного срыва, которая полого выклинивается к дневной поверхности [1], или серии дислокаций, ограниченных породами чехла и подстилающихся слабовозмущенными гнейсами [6], сочленение Попигайской астроблемы с обрамлением характеризуется «погребенной» линзой аутигенной брекчии пород кристаллического фундамента, которая залегает под слабodeформированными толщами чехла (см. рис. 7). Клиппеновые дислокации в чехле закончились гораздо ближе к центру кратера. Возможно, именно поэтому Попигайская астроблема не имеет четко выраженного внешнего вала, поскольку цокольный этаж этого вала не сформировался, а рыхлые насыпные отложения довольно быстро срезались эрозией.

Согласно границе, которую астроблема имеет в породах фундамента, ее диаметр может быть увеличен минимум до 110 км, с соответствующим энергетическим пересчетом мощности взрыва. Сочетание двуслойной структуры мишени с крупномасштабностью импактного процесса привело к тому, что Попигайская астроблема представляет собой уникальный пример импактной структуры, видимый внешний диаметр которой, проводимый по деформациям пород чехла, оказался меньше, чем диаметр ее «погребенной» части.

Восстановим общую феноменологическую картину импактных событий в северо-западном борту Попигайской астроблемы. Эта картина охватывает ударно-волновую и кратерообразующую стадии импактного процесса и воссоздана на основе интерпретации геологических наблюдений [1, 2, 5—8 и др.], представлений о двух типах экскавации и вещественной структуре центробежного донного потока и взрывного облака [2, 4], некоторых оценок по данным [10, 12], а также исходя из реконструкции ударно-волнового процесса и механизмов экскавации, приведенных в данной работе. Где возможно, даны временные оценки событий, а в остальных случаях их последовательность базируется на расшифровке геологических данных. Схематическая колонка аллогенных фаций на борту астроблемы приведена на рис. 8.

1. Через 10—15 с после падения Попигайского космического тела к краевой части будущей астроблемы подошла ослабленная

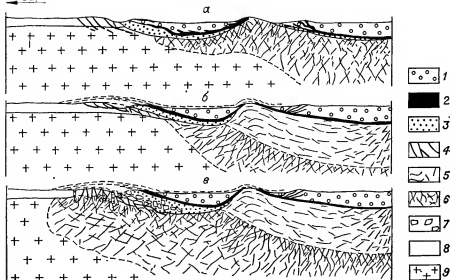


Рис. 7. Глубинное строение красной части Понигайской астроблемы по В. Л. Масайтису [6] (а), по С. А. Вишневскому [1] (б), по результатам данной работы (в) (относительные пропорции астроблемы для наглядности показаны вне масштаба).

1 — зювиты; 2 — спекшаяся толща тагамитов и богатых стеклом донных импактных брекчий (на рис. 7, а — только тагамиты); 3 — мегабрекчии и клиппены (на рис. 7, а — аллогенная брекчия), а также туфовидные донные брекчии с незначительным количеством стекла; 4 — разломы и центробежные надвиги; 5 — зона пластического течения; 6 — аутигенная брекчия; 7 — отдельные клиппены (схематично); 8 — породы чехла; 9 — породы кристаллического фундамента.

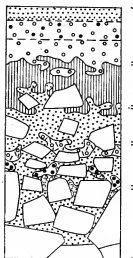


Рис. 8. Схематическая «стратиграфическая» колонка отложений коптогенного комплекса в краевой части Понигайской астроблемы.

Основные структурные подразделения аллогенной толщи: А — тело клиппеновой брекчии; Б — образования смешанного типа: мегабрекчии и клиппены, а также остатки первичного покрова отложений взрывного облака (материал кумулятивных выбросов, ранние и поздние зювиты), разрушенного движением материала центробежного донного потока; В — тело мегабрекчии с отдельными клиппенами; Г — спекшаяся толща тагамитов и игнибритовидных брекчий с отдельными клиппенами; Д — вторичный покров отложений взрывного облака (ранние и поздние зювиты, продукты градационного оседания). Импактные фации: 1 — тонкообломочные продукты градационного оседания; 2, 7 — ранние зювиты, вылетевшие соответственно по крутым и пологим траекториям; 3, 6 — поздние зювиты, вылетевшие соответственно по крутым и пологим траекториям; 4 — тагамиты и донные игнибритовидные брекчии; 5 — мегабрекчии; 8 — продукты кумулятивных выбросов; 9 — клиппены.

ударная волна (упругий предвестник), вслед за которой по поверхности мишени прокатилась волна разрушения осадочных толщ. В результате породы чехла были вспучены и взломаны на крупные блоки, которые со скоростями, вероятно, до нескольких десятков метров в секунду начали сложные перемещения. Сначала, видимо, это были восстающие движения субвертикального направления, а затем к ним добавилось в той или иной мере центробежное смещение по латерали. На рубеже зоны клипшенов массовая блоковая фрагментация пород мишени прекратилась, и далее по дневной поверхности побежала волна вспучивания, которая не сопровождалась заметными дислокациями пород чехла. Одновременно в некоторых участках зоны клипшенов и обрамления, ослабленных доимпактной тектоникой, на поверхность начали прорываться мощные струи брекчированных пород из нижних структурных ярусов чехла и кристаллического фундамента. Кое-где по ослабленным участкам к поверхности быстро выдвигались блоки нижележащих пород.

Во внутренней области кратера в этот период, начиная с момента касания упавшего тела и на протяжении примерно 70—80 с, все измененные породы мишени, которые в дальнейшем принимают участие в экскавации кратера, получили соответствующий импульс на выброс и смещение.

2. Первыми на движущиеся клипшены начали выпадать те ранние высокоскоростные движущиеся по пологим траекториям кумулятивные выбросы, которые смогли преодолеть сопротивление атмосферы (в экспериментах при скорости ударника всего 5—10 км/с скорость таких выбросов может достигать 10—30 км/с). Эти кумулятивные выбросы были обогащены веществом упавшего тела или целиком состояли из него. Продукты этих выбросов, достигшие зоны клипшенов, вероятно, состояли из пепла, конденсатов и закаленного стекла.

3. Затем на поверхность движущихся клипшенов начали поступать отложения наиболее высокоскоростных выбросов взрывного облака (ранние зювиты), вылетевшие из внутренней области кратера и обогащенные веществом упавшего тела. В составе этих продуктов могли быть пепел, конденсаты, комки и обломки закаленного стекла, минералов и пород.

4. Далее, вероятно в виде довольно плотной тучи, оттеснив выпадение ранних зювитов, из внутренней области кратера начали поступать более медленно двигавшиеся струи взрывного облака (поздние зювиты). Они состояли из смеси обломков различно импактированных пород мишени (осадочных и кристаллических) и из продуктов взрывной дезинтеграции импактного расплава. Примесей вещества упавшего тела поздние зювиты уже не содержали. Крупные клипшены у края астроблемы к этому моменту были уже остановлены, но мелкие клипшены, вместе с материалом внешней части центробежного донного потока, видимо, еще продолжали движение. На это указывают наблюдения в бассейне руч. Буордах и в других пунктах, где поздние зювиты находятся в таких соотношениях с клипшеними, которые не исключают цементирующей роли

этих зювитов. Расплавный материал при транспортировке поздних зювитов был охлажден не полностью, и более горячие массы после отложения спекались.

5. Затем к периферии кратера, оттеснив выпадение зювитового материала, докатилась текущая по пологим траекториям плотная масса продуктов тыловой части центробежного донного потока. В ее составе перемещались мелкие клипшены, материал мегабрекчий и донных брекчий с переменным количеством импактного стекла, а также компактные массы тагамитового расплава и горячие палищие тучи суспензии, состоящей из комков стекла, газов и обломков минералов (будущие игнимбритовидные брекчии). В целом наиболее богатые расплавом мелкообломочные продукты дробления архейских пород и тагамиты отлагались в последнюю очередь и образовали спекшуюся толщу, которая перекрыла клипшены и мегабрекчию. Движущиеся продукты испытывали интенсивное контактно-субконтактное перемешивание и захватывали с собой непрерывно осаждавшийся материал зювитов.

6. После торможения центробежного донного потока основным материалом, поступающим на периферию кратера, вновь стали отложения взрывного облака — последние порции поздних зювитов и вылетевшие на большую высоту по крутым траекториям ранние зювиты, стекловатый компонент которых был частично загрязнен веществом упавшего тела.

7. Наконец, в течение довольно долгого времени (несколько суток?) продолжалось градиционное оседание тонкообломочного и пылеватого пеплового материала, поднятого взрывом на большую высоту. В этом материале также возможна примесь вещества упавшего тела.

Многостадийная последовательность отложения аллогенных продуктов разных фациальных типов сочеталась с большой механической активностью материала центробежного донного потока, в результате чего происходило, и, по-видимому, неоднократно, частичное или полное разрушение уже сформированной «стратиграфической» колонки выбросов. Такое разрушение могло происходить, например, вследствие движения клипшенов или за счет перемешивания ранее выпавших продуктов с плотными массами центробежного донного потока. Все это привело к очень сложным взаимоотношениям различных фаций взрывного облака и центробежного донного потока на периферии астроблемы и к появлению здесь целой серии промежуточных образований. Среди них можно отметить, например, клипшены, цементируемые тагамитом, или чередование компактных масс зювитов с тагамитами и игнимбритовидными породами, толщ туфовидных донных импактных брекчий, насыщенные мелкими телами тагамитов, и т. д. Сложные взаимоотношения — одна из основных причин объединения всех мелкообломочных туфовидных брекчий астроблемы, независимо от способа их транспортировки, в единую группу «зювитов», что отмечается в работах [6—8 и др.]. На неправомерность объединения в одну группу истинных зювитов (отложения взрывного облака) и донных импакт-

ных брекчий (отложения центробежного донного потока) мы уже указывали [2]. Расчленение туфовидных брекчий на периферии астроблемы удастся провести по комплексу макроскопических и петрографических особенностей, сопоставляя их с толщами импактитов внутренней области кратера, где зювиты и донные брекчий более четко разграничены по условиям залегания и обладают достаточно выраженным типоморфизмом.

Возвращаясь к проблеме миграции метеоритного вещества в импактитах, затронутой в работе [4], можно отметить, что приведенные реконструкции и заключения позволяют наметить конкретные пути поисков вещества упавшего тела (если оно не было ледяным) в периферийной зоне астроблемы. Достаточно высокая степень эродированности указывает, что основной горизонт-концентратор метеоритного вещества, который венчал здесь разрез аллогенных образований (тонкообломочные продукты градационного оседания и отложения ранних зювитов, выброшенные по крутым траекториям), в настоящее время, видимо, полностью уничтожен. Возможно, что в толще аллогенных образований кое-где сохранились порции тех ранних зювитов, которые были захвачены и рассеяны в этой толще при процессах экскавации кратера. Однако поиски таких зювитов в огромной массе остальных импактитов, стерильных от метеоритного вещества, очень затруднительны. Поэтому при данной степени эрозии краевой части астроблемы наиболее перспективным путем представляется выявление кумулятивных выбросов и тех ранних зювитов, которые были отложены по пологим траекториям на периферии кратера. В результате клипеновых движений и захоронения под более поздними аллогенными отложениями отдельные порции таких обогащенных космическим веществом продуктов могли сохраниться до сих пор, залегая, например, в составе связующей массы клипенов или в основании останцов мегабрекчий в краевой части и в обрамлении астроблемы. Поиск и изучение ранних зювитов и кумулятивных выбросов на периферии кратера представляют собой одну из задач предстоящих исследований.

Другое интересное направление дальнейших работ — это изучение многочисленных мелких тел мегабрекчий, закарпированных в обрамлении Попигайской астроблемы на расстоянии вплоть до 60—65 км от ее центра, особенно в северном направлении. Часть этих тел, возможно, представляет импактные диатремы, а не останцы покрова закратерных выбросов.

Наконец, заслуживает внимания изучение южного и юго-западного обрамления Попигайской астроблемы, где на дневную поверхность выходят архейские породы. Если на момент импактного события здесь имелся осадочный чехол, то в этом районе можно определить границу «погребенной» линзы аутигенной брекчий и особенности ударно-метаморфических изменений кристаллических пород в ее пределах.

Таким образом, вследствие большого масштаба импактного процесса и двучленного строения мишени с более плотными породами в основании Попигайская астроблема имеет следующие особенности:

1) образование кратера сопровождалось сингенетичными импактными диатремами и горстами, развитыми в ее периферии;

2) сочленение структуры астроблемы с невозмущенным обрамлением характеризуется двойной внешней границей. В пределах контура, проводимого по границе зоны клипшен в породах чехла, кратер имеет диаметр до 100 км; по линзе «погребенной» аутигенной брекчии гнейсов его диаметр составляет минимум 110 км.

В заключение автор выражает признательность Г. М. Ивановой, О. Г. Коноваловой, В. Г. Фаст и другим товарищам, оказавшим неоценимую помощь на разных стадиях изучения такого необычного и масштабного объекта, как Попигайская астроблема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневский С. А. К вопросу о морфоструктуре сложных кратеров.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 54—66.
2. Вишневский С. А. Импактиты гигантских сложных метеоритных кратеров.— В кн.: Импактиты. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 171—184.
3. Вишневский С. А. Ударные конусы и брекчии «грис» в Карской астроблеме.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 141—156.
4. Вишневский С. А., Поспелова Л. Н. Некоторые петролого-геохимические особенности проблемы импактных взаимодействий.— В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 156—191.
5. Данилин А. И. К характеристике внутренней структуры толщи аллогенных брекчий и зювитов крупных астроблем.— Метеоритика, 1982, вып. 40, с. 102—106.
6. Масайтис В. Л., Мащак М. С., Селивановская Т. В. и др. Попигайская астроблема.— В кн.: Геология астроблем. Л.: Недра, 1980, с. 114—130.
7. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попигайская котловина — взрывной метеоритный кратер.— Докл. АН СССР, 1971, т. 197, № 6, с. 1390—1393.
8. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попигайский метеоритный кратер.— М.: Наука, 1975.— 124 с.
9. Обербек В. Р. Лабораторное моделирование ударного кратерообразования при помощи взрывчатых веществ.— В кн.: Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977, с. 33—61.
10. О' Киф Дж. Д., Арнс Т. Дж. Ударные эффекты при столкновении больших метеоритов с Луной.— В кн.: Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, 1977, с. 62—79.
11. Поляков М. М., Трухалев А. И. Попигайская вулканотектоническая кольцевая структура.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1974, № 4, с. 85—94.
12. Ударные кратеры на Луне и планетах/Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Флоренский К. П. и др.— М.: Наука, 1983.— 200 с.
13. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика).— М.: Недра, 1984.— 456 с.
14. Энгельгардт В. Расплавы в земных ударных структурах.— В кн.: Сравнительная планетология. Доклады 27 Международного геологического конгресса, т. 19. М.: Наука, 1984, с. 80—88.
15. Ahrens T. J., Gregson V. G. Shock compression of crustal rocks: data for quartz, calcite and plagioclase rocks.— J. Geophys. Res., 1964, v. 69, N 22, p. 4833—4874.
16. Cooper H. F. A summary of explosion cratering phenomena relevant to meteor impact events.— In: Impact and explosion cratering. N. Y.: Pergamon Press, 1977, p. 11—44.

17. Gault D. E., Quaide W. L., Oberbeck V. R. Impact cratering mechanics and structures.— In: Shock metamorphism of natural materials. Baltimore: Mono Book Corp., 1968, p. 87—99.
18. Grieve R. A. F., Robertson P. B. Variations in shock deformations at the Slate Islands impact structure, Lake Superior.— *Contribs Mineral. and Petrol.*, 1976, v. 58, N 1, p. 37—49.
19. Kieffer S. W., Simonds C. H. The role of volatiles and lithology in the impact cratering process.— *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1980, v. 18, N 1, p. 143—181.
20. Oberbeck V. R. Applications of high explosive cratering to planetary problems.— In: Impact and explosive cratering. N. Y.: Pergamon Press, 1977, p. 45—66.
21. Robertson P. B. Zones of shock metamorphism at the Charlevoix impact structure, Quebec.— *Geological Soc. of America Bull.*, 1975, v. 36, N 12, p. 1630—1638.
22. Trulio J. G. Ejecta formation: calculated motion from shallow buried nuclear burst and its significance for high velocity impact cratering.— In: Impact and explosion cratering. N. Y.: Pergamon Press, 1977, p. 919—957.

Э. П. ИЗОХ

## ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД МИШЕНИ, ИМПАКТИТОВ И ТЕКТИТОВ АСТРОБЛЕМЫ ЖАМАНШИН

Ударный кратер (астроблема) Жаманшин расположен в Северном Приаралье в 40 км к юго-западу от пос. Иргиз Актюбинской области. Как установил П. В. Флоренский в 1975 г., это единственная в мире астроблема, в которой одновременно имеются и импактиты, и тектиты. Это открытие явилось своего рода научной сенсацией и вызвало живой интерес специалистов всего мира. Исследования П. В. Флоренского стали этапными в изучении астроблемы. К настоящему моменту астроблема изучена комплексом геолого-геофизических методов. На склонах кратерной воронки пробурено 10 скважин глубиной до 100—200 м, а в центре структуры — одна скважина глубиной 275 м, далеко не достигшая истинного дна. Ни одной из скважин не были вскрыты импактиты или другие стекла, поэтому вопрос о внутреннем строении и составе глубинных частей астроблемы остается открытым. Этот и целый ряд других нерешенных вопросов являются причиной того, что почти во всех публикациях, посвященных Жаманшину, отмечается важность дальнейшего углубленного изучения астроблемы.

Данная статья посвящена первым результатам исследований по составленной программе. В ее основе лежат полевые наблюдения и каменный материал, собранный автором в 1982—1983 гг. (в 1983 — вместе с В. Л. Масайтисом и Я. И. Бойко). Использованы также некоторые образцы Я. И. Бойко, П. В. Флоренского и Г. М. Ивановой, работавших здесь ранее. Рассматриваются преимущественно петрохимические данные, поскольку более углубленное изучение стекол еще не завершено. Тем не менее петрохимическая информация сама по себе дает возможность сделать ряд новых выво-

дов, а главное, позволяет очертить круг вопросов, требующих решения в ближайшем будущем.

В статье использованы результаты более 250 стандартных силикатных анализов пород и стекол, выполненных «мокрым» методом в ИГиГ СО АН СССР и в Центральной лаборатории Оренбургского ПГО (в последней помимо главных окислов определялись также  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ).

Автор искренне благодарен А. А. Трофимуку и Б. Е. Милецкому за содействие своим исследованиям, а также В. Л. Масайтису, П. В. Флоренскому, Я. И. Бойко, С. А. Вишневскому и Г. М. Ивановой за полезное обсуждение и за разрешение использовать их материалы.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ ЖАМАНШИНА

Астроблема Жаманшин расположена в пределах Тургайского прогиба, разделяющего палеозойские складчатые области Урала и Казахстана. Район имеет типично платформенное строение: на сложнодислоцированном протерозойско-палеозойском фундаменте горизонтально лежит чехол меловых и кайнозойских осадочных отложений мощностью до 200 м. Выходы пород фундамента на поверхность в урочище Жаманшин известны давно, они считались признаком локального поднятия фундамента [3, 21]. В начале 60-х гг. Б. В. Пилия обнаружил здесь стекла и пемзы, что послужило основанием для вывода об экзотических для платформы проявлениях молодого вулканизма [10, 12, 13]. Тогда же впервые была высказана догадка о наличии здесь ударного кратера и тектитов [10], однако доказательства этого были получены лишь в 1975 г. П. В. Флоренским [17].

Основной источник излагаемых ниже сведений о геологическом строении Жаманшина, помимо монографии П. В. Флоренского и А. И. Дабижа [19], — результаты геологической съемки, проведенной Б. В. Пилия, и геолого-геофизических работ, выполненных Я. И. Бойко и В. П. Пятковским.

**Складчатый фундамент.** Сведения о его строении и составе основаны на данных по единичным картировочным скважинам, заданным Б. В. Пилия в окрестностях астроблемы и Я. И. Бойко — на склонах кратерной воронки, а также на прямых наблюдениях в смещенных блоках (клиппенах) и в обломках аллотенной брекчии в пределах самой астроблемы. Выделяются две разновозрастные толщи.

1. Вулканогенно-кремнистая толща  $\text{Pt}_2$ — $\text{Pz}_1$  состоит из кремнистых пород (яшм и сланцев) и измененных эффузивов базальтового состава, превращенных в зеленые сланцы. Подчиненную роль играют терригенные породы: алевролитово-глинистые, кремнисто-глинистые, углистые или графитистые и т. п. Породы сильно дислоцированы, вплоть до пльчатости, пронизаны массой кварцевых и



Рис. 1. Схема строения фундамента в районе урочища Жаманшин, по Б. В. Пиляя.

1 — нижняя вулканогенно-кремнистая толща  $Pt_2-Pz_1$ ; 2 — верхняя существенно вулканогенная толща  $C_1$ ; 3 — разломы; 4 — примерные контуры астроблемы.

кальцитовых жил и прожилков, разбиты на блоки разломами. Мощность толщи более 2 км. Б. В. Пиляя разделяет ее на три свиты: нижнюю — существенно кремнисто-сланцевую, среднюю — зеленосланцевую и верхнюю — терригенно-кремнистую. Возраст толщи установлен по аналогии с разрезом западной части Тургайского прогиба, где в кремнистых породах найдены остатки водорослей.

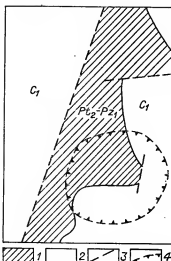
2. Вулканогенно-осадочная толща  $C_1$  состоит главным образом из вулканомиктовых конгломератов, гравелитов и песчаников, а также туфов, туфобрекчий и лав андезитобазальтов с редкими прослоями известняков и липаритоацитов. Характерна сильная гематитизация пород и соответственно красно-бурая или бордовая их окраска, что резко отличает верхнюю толщу от нижней, окрашенной преимущественно в зеленые и серые цвета. Степень дислоцированности и общего метаморфизма здесь гораздо меньше, чем в нижней толще, жилы кварца и кальцита не характерны. Мощность около 1 км, возраст определен по многочисленным находкам визейских фораминифер, криноидей и водорослей в известняках.

Граница между обеими толщами проходит непосредственно внутри контуров астроблемы (рис. 1), поэтому в выбросах аллогенной брекчии наблюдается все разнообразие пород фундамента. Характер этой границы, однако, не ясен: она может быть нормальной стратиграфической, и тогда можно ожидать смены одних пород другими по вертикали, но может быть и тектонической, и тогда переход из одной толщи в другую будет происходить только по латерали. Для суждений о составе и строении области ударного метаморфизма и плавления этот вопрос имеет важное значение, но без глубокого бурения он вряд ли решится.

Платформенный чехол лежит на хорошо выраженной коре выветривания пород фундамента, имеющей мощность 40—45 м и представленной рыхлыми пестрыми глинами. Возраст ее отвечает периоду длительной пенепленизации в конце палеозоя и в мезозое. Разрез чехла следующий.

1.  $K_1$ (альб) — плотные жирные глины, каолино- и бокситоподобные, с невыдержанными слоями песчаников и алевролитов (15—20 м).

2.  $K_2$ (сеноман) — пески, иногда глины (до 40 м).



3.  $K_2$ (турон) — темно-серые и черные глины с прослойками песка (17 м).

4.  $K_2$ (маастрихт) — известковистые песчаники и песчанистые известняки с конкрециями фосфоритов, галькой кварца, остатками белемнитов (1—5 м).

5.  $P_1^1$  — глины, опока, пески, углистый материал (15 м).

6.  $P_2$  (тасаранская свита) — опоковидные и песчанистые глины, алевролиты, пески, иногда сцементированные (65—149 м).

7.  $P_3^2$  (саксаульская свита) — кварцевые пески и песчаники, песчанистые глины, прослой крепких сливных белых кварцитов (2—16 м).

8.  $P_{2-3}$  (чегенская свита) — серые, зеленоватые, желтые, бурые глины с кристаллами гипса, мергелистыми и сферосидеритовыми конкрециями (до 46 м).

9.  $P_3^2$  (чиликтинская свита) — серые и шоколадные глины, алевроиты, серые и желтые пески (иногда карбонатные), прослой гальки и щебня в основании (15—25 м).

10.  $P_3^2 - N_1^1$  (чаграйская свита) — аллювиальные и пролювиальные пески, железистые песчаники, галечники, конгломераты (5—6 м).

11. Q — глинистые пески, супеси, суглинки (лессы). Мощность от 0 до 5 м. В кратерной воронке предполагается мощность озерных четвертичных отложений более 150 м. Детально они не изучались.

Общая мощность осадочного чехла 200—250 м. Образован он преимущественно рыхлыми отложениями, хотя встречаются отдельные сцементированные и даже крепкие прослой.

**Основные черты строения и параметры астроблемы.** Приведенные здесь параметры основаны на новейших геофизических данных [14]. Согласно этим данным, рельеф истинного дна кратера сложный. Кратер представляет собой две вложенные одна в другую воронки: внешнюю и внутреннюю. Внутренняя воронка выработана в породах складчатого фундамента, ее истинный диаметр около 5,5—6 км, истинная максимальная глубина порядка 0,6 км, наклон внешних склонов около 20°. Эта воронка осложнена центральным поднятием пород фундамента с амплитудой около 250 м. По периферии внутренней воронки породы фундамента приподняты на 50—60 м и образуют кольцевое поднятие. Между ним и центральной горкой проходит кольцевой желоб диаметром около 2,5 км.

Внешняя воронка выработана в породах осадочного чехла. Диаметр ее около 13 км, истинная глубина около 200 м, склоны пологие — до 5°. Ее поверхность как бы срезает горизонтальные толщи чехла, которые частью деформированы надвигами и взбросами (аутигенная брекчия).

Положение реконструируемой оси насыпного вала близко совпадает с современной линией водораздела, ограничивающей с севера, запада и юга морфологически выраженную впадину с пологими склонами и плоским дном диаметром 5—6 км (рис. 2). Эта впади-

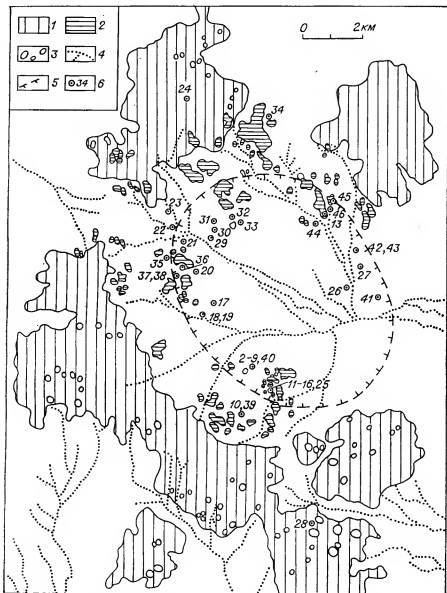


Рис. 2. Схема строения морфоструктуры Жаманши, по Я. И. Бойко [2].

1 — контуры неогенового плато на породах платформенного чехла; 2 — выходы и глыбы пород фундамента; 3 — мелкие кольцевые морфоструктуры (спутничные кратеры); 4 — сухие русла; 5 — контуры погребенной кратерной воронки; 6 — номера точек и образцов.

на («блюдец») примерно отвечает внутренней воронке и заполнена озерными отложениями, под которыми залегает аллогенная брекчия [19].

Энергия взрыва ударившего тела должна оцениваться по диаметру морфоструктуры в целом, т. е. с учетом параметров внешней воронки, ранее не выделявшейся. Соответственно энергия будет выше предполагавшейся ранее: не  $1,1 \cdot 10^{25}$  эрг [19], а  $6 \cdot 10^{26}$  эрг [14], что позволяет предвидеть и более широкое распространение в кратере продуктов ударного метаморфизма и плавления.

### ИСХОДНЫЕ ПОРОДЫ МИШЕНИ

Эти породы петрохимически до сих пор остались почти неизученными. Внимание исследователей было обращено на импактные стекла и тектиты. Не избежал столь естественного «уклона» и автор данной статьи, и поэтому приводимую ниже характеристику пород фундамента нельзя считать исчерпывающей. Практически не описанными все еще остаются образования осадочного чехла. Этот пробел предстоит восполнить в ближайшем будущем.

Материалом для анализа (табл. 1—9) послужили образцы пород, отобранные из обломков аллогенной брекчии или же из отдельных глыб и смещенных блоков фундамента. Некоторые образцы взяты из кернов, оставленных на месте бурения.

Породы нижней толщи фундамента  $Pt_2$  —  $Pz_1$  встречаются почти исключительно в северной и западной частях астроблемы. Общую картину их распространения (как и любых других описываемых пород) нетрудно представить по номерам точек наблюдения (и соответствующих им образцов в таблицах), показанных на рис. 2. Среди рассматриваемых пород резко доминируют две группы: зеленые сланцы (метабазальтоиды) и кремнистые сланцы, тесно ассоциирующие друг с другом. Кроме того, среди них встречены кислые эффузивы (порфирииды), а в кернах скважины № 3 (точка 17) ультрабазиты.

Базальтоиды почти полностью превращены в состоящие из альбита, хлорита, актинолита и серицита зеленые сланцы, пронизанные массой кварцевых и кальцитовых жил и прожилков. Обогащенные кальцитом образцы вынесены в отдельную выборку (см. табл. 1, 2). В шлифах иногда распознаются первичные структуры, характерные для спилитов, диабазов и габбро-диабазов. В составе пород по сравнению с вулканитами верхней толщи низко содержание кремнезема и высоко — магния и железа.

Кремнистые породы обычно сильно рассланцованы, но иногда плотные, яшмовидные. Преобладают серые и зеленоватые породы, более редки красные. В шлифах всегда отмечается то или иное количество серицита, хлорита, углистого вещества или же графита, иногда кальцита. Химизм их типичен для подобных пород (см. табл. 3).

Ультрабазиты (см. табл. 4) очень изменены, превращены в агрегат серпентина, хлорита, рудного минерала.

Таблица 1

Зеленые сланцы  $Pt_3$  —  $Pz_1$ , богатые кальцитом

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	41К	41,44	1,05	18,81	5,19	5,23	0,70	3,95	9,33	4,08	0,22	9,57	0,35	0,60	0,05	6,12	99,67
2	45П	47,82	2,09	15,86	8,14	2,90	0,09	4,42	6,82	4,20	1,56	5,53	0,29	0,35	0,00	2,35	99,72
3	35а	43,80	0,47	17,37	3,91	7,02	0,13	6,63	10,50	1,72	2,46	6,19	0,10	0,04	0,02	2,36	100,32
4	41л	42,00	0,56	16,37	3,30	3,03	0,15	3,77	12,12	3,59	1,31	13,15	0,15	0,98	0,02	8,10	99,52

Таблица 2

Зеленые сланцы  $Pt_3$  —  $Pz_1$ , бедные кальцитом

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	34а	43,50	2,41	17,54	2,50	11,31	0,15	7,54	4,97	3,33	0,28	5,87	0,31	0,00	0,00	0,55	99,71
2	32а	46,46	3,14	15,78	4,31	10,00	0,14	5,21	5,33	3,22	0,45	5,20	0,42	0,33	0,00	0,22	99,63
3	45з	47,27	1,98	15,09	1,66	9,58	0,09	8,40	5,70	3,16	0,53	5,85	0,31	0,40	0,00	1,65	99,62
4	45к	51,75	0,32	17,09	1,77	7,95	0,07	6,67	6,27	4,22	0,20	3,14	0,11	0,17	0,03	0,55	99,59
5	36а	53,50	2,32	15,85	2,96	3,47	0,11	4,69	3,69	5,00	0,10	4,37	0,33	0,00	0,00	0,93	100,39

Таблица 3

Кремнистые породы  $Pt_2 - Pz_1$ 

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	356	79,70	0,30	8,77	3,06	1,81	0,04	1,02	0,42	3,44	0,80	0,67	0,08	0,12	0,00	0,00	100,11
2	43л-1	80,50	0,24	5,35	0,31	2,19	0,04	7,45	0,57	0,22	0,12	3,00	0,09	0,24	0,00	0,33	100,08
3	43л-3	82,30	0,44	8,01	0,82	1,69	0,01	0,61	0,71	1,55	1,87	1,43	0,12	0,31	0,23	0,22	99,77
4	17-3	85,64	0,37	5,55	1,40	1,28	0,06	0,25	0,98	1,05	1,31	1,74	0,07	0,00	0,00	0,00	99,80
5	43л-2	88,68	0,24	4,68	0,34	1,44	0,01	1,22	0,57	1,30	0,77	0,67	0,08	0,09	0,00	0,33	100,01
6	21-1	89,00	0,14	4,06	2,93	0,62	0,05	0,30	0,42	0,05	0,93	1,47	0,10	0,00	0,00	0,00	100,07
7	Д5е	89,50	0,14	3,97	0,52	1,61	0,14	0,50	0,63	0,32	0,56	1,58	0,14	0,00	0,00	0,00	99,51
8	24-1	91,40	0,04	0,33	1,27	2,93	0,05	1,80	0,42	0,05	0,10	1,02	0,11	0,00	0,00	0,00	99,52
9	29б	91,58	0,16	4,05	0,03	1,24	0,01	0,20	0,71	0,18	0,94	0,46	0,06	0,20	0,00	0,00	99,62
10	15-1	93,83	0,09	1,01	0,02	1,73	0,01	0,35	0,55	0,05	0,25	1,69	0,07	0,00	0,00	0,00	99,65
11	29а	94,52	0,07	1,52	0,18	1,78	0,02	0,20	0,57	0,07	0,31	0,30	0,13	0,20	0,00	0,00	99,67
12	Ф	98,40	0,02	0,40	0,07	0,30	0,01	0,31	0,26	0,10	0,06	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	100,41
Среднее ...		89,96	0,19	4,03	0,92	1,57	0,03	1,21	0,57	0,70	0,67	—	0,08	0,09	0,01	0,07	—

Таблица 4

## Измененные ультрабазиты

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма
1	17-1	29,69	0,04	0,42	1,36	4,87	0,12	33,05	0,42	0,05	0,40	29,37	0,05	99,54
2	17-2	25,52	0,11	7,43	5,82	5,08	0,19	24,00	7,96	0,05	0,40	23,35	0,07	99,68

Таблица 5

## Порфиранды

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	38а	74,10	1,30	16,53	1,12	4,54	0,08	0,81	1,13	0,90	1,46	0,64	0,15	0,21	0,04	0,22	99,80
2	35г	74,30	0,30	15,00	1,49	0,78	0,01	0,81	0,85	3,90	4,40	0,95	0,01	0,06	0,02	0,39	99,82
3	35в	75,36	0,04	13,66	0,71	0,82	0,01	0,20	0,42	4,23	4,10	0,39	0,01	0,00	0,00	0,60	99,95
Среднее ...		73,18	0,55	15,19	1,11	2,06	0,03	0,61	0,80	3,03	3,34	—	0,05	0,09	0,02	0,40	—

Таблица 6

Вулканы С<sub>1</sub>, богатые известью

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	39ж	45,54	0,85	18,18	7,77	1,11	0,13	2,22	9,49	2,63	1,46	10,24	0,26	0,50	0,04	7,17	99,92
2	41м	49,00	0,95	17,71	7,30	2,42	0,13	3,77	4,24	4,92	1,08	7,87	0,24	0,74	0,08	2,59	99,71
3	9-1	50,24	0,87	17,38	6,29	1,52	0,16	2,40	8,66	1,75	1,11	9,44	0,22	0,00	0,00	—	100,00
4	Ф	53,20	0,64	20,60	7,14	0,59	0,11	2,35	6,75	4,80	0,68	1,24	0,00	0,00	0,00	2,01	100,35
5	26б	55,10	0,66	15,70	5,50	1,22	0,09	2,30	7,53	1,29	1,67	8,43	0,19	0,35	0,00	5,72	99,68

Таблица 7

Вулканы С<sub>1</sub>, бедные известью

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	25а-2	50,82	0,90	19,92	7,02	1,61	0,11	3,42	4,97	5,82	1,43	3,18	0,30	0,47	0,55	99,50
2	25а-1	51,58	0,83	20,89	7,62	1,28	0,08	3,17	2,56	6,18	2,17	2,86	0,31	0,39	0,39	99,53

Глины насынного вала (по Я. И. Бойко)

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.л.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	Сумма	Сектор вала
1	60,06	0,90	13,65	6,95	0,07	0,08	2,20	4,79	1,27	1,80	7,73	0,27	4,20	99,77	Северо-восточный
2	62,84	0,77	17,33	4,52	0,49	0,03	1,59	1,47	1,55	2,63	5,40	0,17	3,23	98,79	Северный
3	58,26	0,72	16,45	5,75	0,49	0,05	2,43	1,57	2,31	2,40	9,30	0,47	4,62	100,20	Северо-западный
4	67,70	0,96	13,41	2,66	1,86	0,05	2,07	1,85	1,86	2,20	4,77	0,13	2,80	99,66	Северо-западный
5	59,82	0,96	16,74	7,63	0,07	0,10	2,19	1,26	1,68	2,50	7,32	0,15	3,86	100,42	Западный
6	65,49	0,92	13,13	5,29	0,49	0,06	2,03	2,08	0,67	2,00	6,19	0,33	3,70	99,68	Восточный

Таблица 9

Почвенные лесовидные суглинки

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.л.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Co <sub>2</sub>	Сумма
1	44б	71,85	0,79	14,41	3,52	1,20	0,04	1,74	0,99	0,98	2,42	5,03	0,12	2,22	0,28	0,33	100,07
2	44а	72,89	0,75	14,28	3,04	2,02	0,04	0,92	1,42	0,92	2,08	4,31	0,14	2,31	0,35	0,33	100,16
3	28а	73,36	0,78	9,96	1,01	1,09	0,02	0,51	2,56	1,50	2,54	4,56	0,10	1,55	2,19	0,00	100,18
4	26а	75,41	0,80	10,69	3,93	0,50	0,04	1,17	1,28	0,83	2,08	3,06	0,07	2,14	0,00	0,50	99,86

Примечание. 2 — поверхность почвы в «блюдце» кратера; 1 — то же, с глубины 30 см; 3 — почва в кратере-сателлите к югу от кратера; 4 — почва из устья кратера № 10.



Порфиroidы (см. табл. 5) встречены только в западной части астроблемы (точки 35, 38) в виде единичных обломков аллогенной брекчии вместе с metabазальтоидами и кремнистыми сланцами. Подобно последним, они рассланцованы и серицитизированы и поэтому должны быть отнесены именно к нижней толще фундамента. Однако нужно напомнить, что Б. В. Пиля и Я. И. Бойко описывают кислые эффузивы только в составе верхней толщи. Остается неясным, есть ли более молодые кислые вулканы и какова вообще роль подобных пород в составе фундамента.

Породы верхней толщи фундамента  $C_1$  в отличие от предыдущих распространены почти исключительно в восточной и южной частях астроблемы. Судя по обломкам аллогенной брекчии, в ней преобладают туфогенные песчаники, гравелиты и конгломераты, состоящие из порфиритов и туфов и в небольшой мере из песчаников, сланцев и известняков. В зависимости от роли последних породы разделены на две группы (см. табл. 6, 7). В отличие от более древних вулканических рассматриваемые породы окрашены в красноватые, бурые и бордовые тона. Соответственно в них повышено содержание окисного железа. Они практически лишены признаков зеленокаменных изменений и регионального метаморфизма. Порфириты, их туфы и другие обломочные породы очень близки между собой по составу. По сравнению с вулканическими нижней толщи в них меньше магния, они немного кислее, т. е. должны быть отнесены к андезитобазальтам. По другим компонентам вулканы обеих толщ близки.

Породы осадочного чехла, как уже сказано, специально не изучались. Некоторое представление об их составе дают анализы рыхлого существенно глинистого материала, слагающего насыпной вал кратера (см. табл. 8). В него погружены обломки аллогенной брекчии, происходящие из фундамента и не сцементированные друг с другом. Судя по всему, этот материал также аллогенный и представляет собой смесь различных меловых и палеогеновых глин, преобладающих в разрезе, что, однако, в дальнейшем должно быть проверено.

Почвы, взятые для анализа (см. табл. 9), образуют маломощный покров (2—3 м) в понижениях рельефа, в том числе в кратерах-сателлитах. На возвышенностях он очень тонкий или вообще отсутствует, а поверхность окружающих кратер плато покрыта плиоцен-четвертичными галечниками. Проанализированные почвы, разумеется, моложе самой астроблемы, и можно лишь предполагать, что в момент ударного взрыва состав почв был примерно таким же.

## ИМПАКТИТЫ И ТЕКТИТЫ ЖАМАНШИНА

П. В. Флоренский [19] выделил в Жаманшине два типа стекол, получивших собственные названия: жаманшиниты и иргизиты. Первые он отнес к импактатам, а вторые к тектитам, считая их результатом конденсации вещества раскаленного ударно-взрывного облака, но не продуктами прямого ударного плавления. В тех и других

он различал стекла основного и кислого состава. Классификация и номенклатура стекол, предложенная П. В. Флоренским, применяется во всех публикациях, относящихся к Жаманшину. Тем не менее новый фактический материал вынуждает нас внести необходимые коррективы в прежние представления, сохранив при этом суть классификации П. В. Флоренского и ставшие уже привычными названия стекол.

К импактитам, как принято, относятся стекла, образованные из пород мишени. Различаются два главных типа импактитов [15, 16]: импактиты 1-го рода, т. е. ударно-витрифицированные непеременные стекла, сохраняющие текстуру первичных пород, и импактиты 2-го рода — продукты охлаждения смешанных ударных расплавов. К последним отнесены основные и часть кислых жаманшинитов, а также основные «брызги» (термин П. В. Флоренского). Импактиты 2-го рода в целом подразделяются на основные, умеренно кислые и кислые, причем отдельно стоят смешанные стекла — такситы. По текстуре выделяются стекла массивные (или плотные), кавернозные, пузырчатые и сильно пузырчатые (пемзы). Особую группу составляют шлаки, т. е. стекла (чаще всего пемзы) с реликтами исходных пород. По форме различаются небольшие тела типа покровов или даек, бомбы, лапилли и неправильные обломки более крупных тел.

К тектитам отнесены кислые жаманшиниты, по составу и всем другим свойствам, вплоть до значений абсолютного возраста, аналогичные и даже тождественные тектитам-индошинитам типа Мунг-Нонг. В особую группу выделены кислые иргизиты, родственные кислым жаманшинитам, но, вероятно, отличающиеся от них по происхождению.

**Пространственное распределение импактитов и тектитов в пределах астроблемы.** Специфика Жаманшина, уже отмечавшаяся ранее [1, 2, 19], состоит в том, что аллогенная брекчия и все другие продукты ударного метаморфизма и плавления локализованы в пределах кратерной воронки насыпного вала, т. е. не далее 7—8 км от центра морфоструктуры. Возможность размыва и сноса (удаления) дальних выбросов, если бы они существовали, необходимо исключить на следующих основаниях. Во-первых, в окрестностях кратера на приподнятых плато сохранился не только весь разрез осадочного чехла, но и самые поздние неоген-четвертичные галечники, что исключает существенную эрозию в пределах района в четвертичное время. Во-вторых, нет признаков глубокого размыва и переотложения материала насыпного вала. Кроме того, Я. И. Бойко [1, 2] в ближайших окрестностях астроблемы описал более 60 мелких сателлитных кратеров, большей частью хорошо сохранившихся, что также исключает ее размыв. Существенно то, что упомянутые кратеры, по Я. И. Бойко, скорее всего, являются следами ударов небольших тел-сателлитов, сопровождавших в виде роя главное ударившее тело, а не следствием вторичных выбросов материала из кратера во время взрыва.

Для того чтобы проверить предположение П. В. Флоренского

о выпадении тектитов-иргизитов из взрывного облака и соответственно о возможности обнаружить их далеко за пределами материнского кратера, автор провел специальные поиски признаков «тектитового ливня» в прилегающих районах Казахстана, как вблизи Жаманшина, так и в удалении от него на сотни километров по маршрутам Кустанай — Аркалык — Тургай — Иргиз и Актюбинск — Иргиз. Осмотрены все поверхности выравнивания, сухие русла и т. п., и особенно внимательно обследованы разрезы четвертичных отложений в карьерах близ г. Аркалык и в речных террасах рек Тургай и Иргиз. Признаков тектитов не обнаружено. Таким образом, нет никаких доказательств того, что Жаманшин может быть источником полей рассеяния тектитов, хотя такого рода предположения уже не раз высказывались.

В пределах морфоструктуры, как уже упоминалось, состав обломков аллогенной брекчии, т. е. пород фундамента, в разных ее частях различен: в северо-западной половине преобладают породы нижней толщи, а в юго-восточной — верхней, что, скорее всего, отражает блоковое строение фундамента. Распространение импактитов 1-го рода как будто согласуется с этой картиной, хотя детальных наблюдений не проводилось.

Распределение различных стекол внутри астроблемы достаточно своеобразно и заслуживает специального внимания. Прежде всего надо подчеркнуть, что импактиты и тектиты составляют лишь малые доли процента от общей массы насыпного вала, сложенного обломками пород фундамента и перемешанным рыхлым материалом осадочного чехла. Зювитов, присущих большинству других астроблем [5, 9], в Жаманшине не обнаружено.

В пределах насыпного вала стекла залегают в виде изолированных небольших изометрических пятен-ареалов, размером от 30 до 200 м в поперечнике. Обычно они отделены друг от друга сотнями метров или километрами, но иногда располагаются рядом, хотя и не соединяются. Нами обследовано более 20 из 30—40 ареалов. Границы ареалов довольно четко очерчены, признаков сколько-нибудь существенного переноса стекол, а тем более их окатанности нет. Складывается впечатление, что ареалы стекол располагаются на месте их выпадения, хотя не исключено, что они опускаются по вертикали из-за выдувания рыхлого цемента (дефляции).

Каждый ареал имеет свои индивидуальные особенности. Одни ареалы состоят только из тектитов-жаманшинитов (точки 2—9, 20, 22, 36—38, 46 на рис. 2), другие — только из основных импактитов (точки 27, 33, 42, 43), третьи — из тех и других. Иргизиты образуют отдельный ареал (точки 11—16), описанный П. В. Флоренским, хотя, по Я. И. Бойко, они в небольших количествах встречаются еще в нескольких местах. Ареалы различаются по форме, размерам бомб или их обломков, по облику и строению стекол и другим признакам. Это еще раз свидетельствует о неперемещенном характере ареалов. Приведем некоторые примеры.

Ареал тектитов на юге астроблемы (точки 2—9) состоит только из небольших (до 5—6 см) обломков черных или слегка буроватых

плотных стекол, более всего схожих с тектитами типа Муонг-Нонг. Изредка попадаются тектиты с голубоватыми участками (вероятно, это признак особо высокой восстановленности). Второй подобный ареал встречен на северо-западе астроблемы (точка 22), т. е. на значительном удалении от первого.

Небольшой ареал правильных тектитовых бомб размером до 20—25 см с хорошо выраженной «хлебной коркой» расположен на севере (точка 46). Подобные бомбы еще раз были встречены только на северо-западе (точка 31), на этот раз в ассоциации с обломками основных импактитов.

Особые ареалы крупных обломков тектитов-жаманшинитов с обильной желтой пемзой свойственны южной части астроблемы (точки 10, 37). Основные импактиты в виде хорошо сформированных бомб характерны только для северных и восточных ареалов (точки 33, 41, 42, 45), а в виде шлаков и пемз — для восточных и южных (точки 26, 27, 10 и др.). Бомбы такситов основного состава развиты только на севере (точка 33).

Детальное вещественное картирование ареалов и сопоставление их друг с другом и с составом аллогенной брекчии еще не проведено. Следует иметь в виду, что такой метод может быть применен для выяснения особенностей выпадения стекол, например струйных выбросов расплава.

**Импактиты 1-го рода.** Импактиты 1-го рода установлены только по породам складчатого фундамента. Признаков их образования за счет пород осадочного чехла пока не обнаружено. Возможно, импактитов там нет из-за «рыхлости» чехла.

Установлено два типа импактитов, отвечающих наиболее распространенным породам фундамента: кремнистым и вулканогенным. За счет кремнистых пород и пронизывающего их кварца возникают светло-серые, белесые или белые породы, очень легкие (но не пемзовидные), часто сохраняющие первичную слоистость, сланцеватость или же комковатое строение жильного кварца. Участками в них развит лещательерит, как продукт начального плавления кварца [19]. Именно в таких породах С. А. Вишневский обнаружил коэсит [4]. Позднее уже в наших образцах подобных пород им было подтверждено значительное развитие коэсита.

В шлифах рассматриваемые импактиты преимущественно изотропны, с реликтами кварца и коэсита. Пустоты нередко заполнены тонкозернистыми землистыми агрегатами гипса или известняка, вообще обычными для любых пористых пород Жаманшина и являющимися результатом действия грунтовых вод. По химизму (табл. 10) породы не отличаются от исходных кремнистых сланцев (см. табл. 31), приближаясь иногда к почти чистому кварцу.

За счет вулканогенных пород нижней и верхней толщ фундамента возникают импактиты 1-го рода, которые не всегда отличаются по облику и химизму (табл. 14). Следует отметить, что импактиты по зеленокаменным породам нижней толщи иногда сохраняют сланцеватость, реликты порфировой структуры и даже характерный зеленоватый цвет, хотя в целом породы сильно осветлены. В их хими-

ческом составе низко содержание кремнезема и высоко — магния, что свойственно именно вулканитам нижней толщи. Импаكتиты по порфири-там или обломочным породам верхней толщи сохраняют как характерную текстуру первичных пород (фото 1—3) и присущую им бордовую или кирпично-красную окраску, так и все черты химизма (см. табл. 11). Именно такие импаكتиты, судя по описанию и по приведенным анализам, были приняты П. В. Флоренским за «обожженные глины» [19].

Существенная часть импаكتитов 1-го рода по вулканитам представляет собой сильно осветленные легкие рыхловатые бесструктурные породы, которые трудно или невозможно отнести к той или иной толще. Труднее всего диагностировать мелкие включения в пемзах, шлаках или массивных стеклах основного состава, окрашенные в бледные зеленоватые, сероватые или беловатые тона. Возможно, такая окраска является не первичной, а вторичной, обусловленной более высокой восстановленностью железа, что прямо вытекает из химизма пород. В целом можно заключить, что среди импактитов 1-го рода все же преобладают андезитобазальты  $C_1$ .

Импактиты 2-го рода. Для того чтобы сравнить расплавные стекла с породами мишени, с тектитами и друг с другом, удобно подразделить их по составу на три группы, имеющие определенное генетическое значение: основные, умеренно кислые и кислые.

Основные импакти-ты, в свою очередь, подразделяются на три группы, различающиеся по форме стеклов, но тождественные по составу: шлаки и пемзы; бомбы; лапилли (основные иргизиты, по П. В. Флоренскому).

Таблица 10

Импактиты 1-го рода по кремнистым сланцам

№ п/п	№ образ-ца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Ca <sub>2</sub>	Сумма
1	39е	72,27	2,27	15,70	1,83	1,41	0,04	0,30	0,35	0,46	0,75	4,15	0,03	0,52	0,27	0,27	99,53
2	38а	74,38	0,52	9,45	1,42	1,15	0,02	1,02	4,34	0,40	1,40	5,47	0,12	0,00	0,20	3,30	99,89
3	32б	75,54	0,63	9,45	1,27	2,15	0,05	1,22	1,89	1,33	1,81	3,82	0,25	0,70	0,91	0,33	100,32
4	38г	80,50	0,18	5,40	1,18	2,23	0,08	1,22	3,69	0,35	0,87	4,06	0,16	0,26	0,13	2,31	100,05
5	38в	80,70	0,20	3,67	2,01	1,65	0,03	1,12	4,26	0,30	0,43	5,18	0,16	0,48	0,08	3,09	99,79
6	32в	83,92	0,38	5,40	0,40	1,68	0,04	0,51	2,27	1,07	0,78	3,24	0,15	0,50	0,33	1,00	100,17
7	Ф	88,09	0,23	4,80	0,60	1,44	0,00	0,34	0,77	0,57	0,25	2,78	0,00	0,00	0,00	0,00	96,94
8	31н	90,38	0,20	2,36	0,31	2,23	0,05	0,36	0,85	0,18	0,40	2,78	0,11	0,61	0,14	0,00	100,20
9	Ф	98,02	0,00	0,10	0,31	0,28	0,01	0,20	0,30	0,09	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,37

Импактиты 1-го рода по вулканическим породам  $Pt_2$  —  $Pz_1$  и  $C_1$ 

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	38д	44,42	1,33	23,46	11,63	2,42	0,45	1,93	3,83	0,82	0,91	8,44	0,32	1,21	0,20	2,42	99,66
2	Ф	45,70	1,58	16,75	12,70	1,87	0,43	3,39	6,96	2,78	1,38	3,01	He	0,00	He	2,83	99,08
3	42д	48,48	1,00	21,55	7,03	5,50	0,08	5,70	1,70	4,00	1,92	2,36	0,22	0,42	0,07	0,55	99,61
4	26г-1	48,50	0,72	19,56	6,80	1,67	0,15	3,06	10,51	2,70	1,47	3,38	0,26	0,96	1,52	1,00	100,30
5	39д-36	49,32	0,90	17,71	7,31	3,03	0,43	2,70	8,48	3,33	1,44	4,15	0,26	0,88	0,66	2,09	99,72
6	43г	49,37	0,94	19,54	6,04	2,79	0,06	3,08	7,01	3,36	1,54	5,37	0,30	0,79	0,28	2,75	99,68
7	Ф	50,12	0,80	21,10	7,27	2,72	0,09	2,01	5,33	2,62	1,70	—	0,16	0,00	He	He	93,92
8	26г-2	50,80	0,83	18,22	6,47	3,18	0,14	3,22	7,88	3,44	1,93	2,11	0,27	0,65	1,01	0,28	99,50
9	43ж	51,16	0,96	20,29	6,18	2,99	0,10	2,76	8,38	2,77	1,28	2,28	0,24	0,47	0,39	1,43	99,70
10	27а	51,68	1,85	20,50	7,63	1,94	0,11	2,74	6,28	3,78	1,47	1,35	0,36	0,33	0,06	0,00	100,31
11	43е	51,86	0,85	18,71	6,89	1,73	0,06	2,46	8,80	1,71	1,16	5,54	0,23	0,57	0,00	3,97	99,99
12	41н	52,52	0,90	20,93	6,70	2,42	0,13	3,55	5,22	4,67	0,78	1,47	0,22	0,54	0,23	0,44	99,74
13	43и	52,55	0,70	18,65	3,88	3,78	0,10	3,59	8,14	2,86	1,31	3,80	0,27	0,65	0,06	1,98	99,69
14	Ф	54,00	1,06	24,20	9,00	0,00	0,21	1,85	5,48	4,03	0,84	0,00	0,00	0,00	He	He	100,67
15	Ф	54,37	0,79	20,02	7,31	2,60	0,17	3,01	7,54	3,74	1,46	0,00	0,20	0,00	He	He	101,20
16	43к	55,24	0,75	19,70	6,24	1,44	0,11	2,25	5,96	3,85	0,85	3,30	0,27	0,86	0,05	0,11	100,01
17	Ф	56,00	1,12	21,20	9,70	0,00	0,17	0,43	5,65	4,05	0,67	0,00	0,00	0,00	He	0,00	99,99
18	38е	58,12	0,82	13,84	1,78	4,79	0,11	1,02	6,24	1,21	2,00	9,01	0,29	0,77	0,38	1,21	99,61

Примечание. 1, 3, 5 — мелкозернистые импактиты, сохраняющие признаки исходных зеленых сланцев  $Pt_1$  —  $Pz_1$ ; 4, 6, 8—10, 12, 16 — бороздчатые и красно-бурые импактиты, сохраняющие строение исходных гнейсов и порфирагов  $C_1$ ; 11, 13, 18 — импактиты неясной принадлежности; 2, 7, 14, 15, 17 (образец Ф) — обожженные глины, по П. Б. Флоренскому.

Шлаки и пемзы основного состава объединены, ибо различия между ними условны. Шлаки — неоднородные угольно-черные или темно-серые породы с прихотливым сочетанием участков плотных, слабопузырчатых или пемзовидных стекол, часто с включениями бордовых, серых, зеленоватых или белых импактитов 1-го рода. Включений неизмененных (первичных) пород мишени практически нет. Пемзы — сравнительно однородные угольно-черные легкие породы, обычно тесно ассоциирующие со шлаками.

Пемзы и шлаки образуют наиболее крупные тела в астроблеме, занимающие на поверхности площадь до 10—20 м<sup>2</sup>, мощность до 0,5 м. Они вскрывались канавами и описаны П. В. Флоренским и Я. И. Бойко как залежи (покровы) или дайкообразные тела, хотя объемная их форма осталась не до конца ясной. Местами, например в точке 10 на юге астроблемы, шлаки и пемзы слагают россыпь крупных глыб (до 0,5—1 м), явно представляющих собой почти непеременные фрагменты единого бескорневого тела, возможно раздробленного при падении. Встречаются и отдельные шлаковые бомбы.

В шлифах породы выглядят как бурая, серая или черная почти непрозрачная изотропная масса с участками слабо раскристаллизованного стекла.

По химическому составу (табл. 12) они ближе всего андезитобазальтам верхней толщии фундамента, а не базальтам нижней толщии. Наличие или отсутствие включений импактитов 1-го рода, крупных каверн, вариации пористости-пузырчатости заметного влияния на состав не оказывают. Нет также признаков перемешивания стекол и в бомбах сложного состава, состоящих из черных и желтых пемз (см. № 5, 15, 17 в табл. 12; фото 4).

Массивные основные жаманшиниты тесно связаны со шлаками и пемзами основного состава, граница между ними также в большой мере условна, так как в массивных стеклах нередко встречаются пузырьчатые или пемзовидные участки, местами обильны включения импактитов 1-го рода (фото 5). В то же время есть случаи, когда плотные стекла содержат ксенолиты шлака (фото 6). Это значит, что пемзы-шлаки и плотные стекла отражают не столько разные стадии единого процесса, сколько разные участки очага ударного плавления, различающиеся по Р—Т-условиям и газонасыщенности. Эта идея, по-видимому, может быть проверена по свойствам самих стекол.

Основные импактиты образуют превосходной формы, в принципе неотличимые от вулканических, разнообразные бомбы, обладающие даже характерной «канатной» поверхностью (фото 7—10). Но чаще всего они встречаются в виде фрагментов бомб или неправильных обломков.

Под микроскопом расплавленные основные стекла чаще всего обнаруживают слабую раскристаллизацию с игольчатыми, звездчатыми или столбчатыми микролитами плагиоклаза, пироксена и рудного минерала. По цвету стекла варьируют от темных, почти непрозрачных, до бурых и даже бесцветных. Обычна полосчатость и флюидальность, подчеркиваемая чередованием разноокрашенного стекла,

Основные импактиты : илалит-пемзы

№ п/п	№ образ-ца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Co <sub>2</sub>	Сумма
1	26г-3	50,36	0,97	18,55	7,00	3,22	0,13	3,47	8,09	3,75	1,40	2,43	0,27	0,48	1,18	0,11	100,52
2	26д	51,12	0,94	20,56	7,53	1,94	0,15	2,84	8,52	3,50	1,27	1,43	0,28	0,35	0,28	0,33	100,38
3	18-2	51,73	0,80	19,30	4,47	3,63	0,13	1,94	7,43	2,73	1,77	5,41	0,23	1,71	He	He	100,68
4	14-2	52,25	0,66	21,60	4,15	4,96	0,17	2,30	7,19	2,88	1,27	1,95	0,20	0,00	опр.	опр.	99,57
5	33н-2	52,38	0,77	19,40	7,37	2,39	0,14	2,95	7,95	3,44	1,31	1,29	0,22	0,00	0,26	0,33	99,84
6	43д	52,68	0,80	20,02	5,68	3,61	0,11	1,43	9,60	2,30	1,24	1,76	0,28	0,65	0,03	0,77	99,54
7	30г	53,04	0,77	19,20	7,31	2,93	0,15	3,06	6,25	3,65	1,56	1,24	0,34	0,24	0,05	0,33	99,55
8	31м	53,20	0,84	19,41	4,27	3,80	0,10	3,47	6,52	3,58	1,59	2,84	0,22	0,50	0,77	0,11	100,31
9	39д-3а	54,00	1,00	20,20	5,67	3,72	0,11	2,13	6,06	3,41	1,73	1,24	0,21	0,44	0,04	0,83	99,50
10	31л	54,00	0,90	20,09	4,86	4,01	0,11	3,06	6,67	3,56	1,76	0,58	0,30	0,24	0,24	0,22	100,14
11	Д4	54,33	0,90	19,60	6,86	2,20	0,14	2,83	7,96	3,60	1,40	0,32	0,20	0,16	He	He	100,50
12	10б	54,46	0,95	19,04	2,52	8,05	0,19	2,60	6,51	3,10	1,47	0,88	0,17	0,00	»	»	100,94
13	10а	54,58	0,73	18,06	4,98	1,73	0,12	2,40	7,20	2,71	0,77	6,57	0,06	0,00	»	»	99,91
14	14-1	55,73	1,00	20,85	4,74	4,64	0,15	2,15	5,90	3,00	1,62	0,50	0,19	0,24	»	»	100,71
15	39д-1	56,02	0,95	19,19	6,14	3,22	0,13	2,33	5,37	3,03	1,77	1,49	0,24	0,44	0,04	0,49	99,91
16	39в-1	56,08	0,85	18,44	3,56	5,86	0,13	2,24	5,96	2,44	1,93	1,67	0,29	0,11	0,46	0,99	99,91
17	39д-2а	57,82	1,20	17,71	2,44	5,73	0,11	1,11	5,93	0,97	1,00	2,48	0,12	1,20	2,99	1,10	99,61
18	10д	57,83	0,80	19,30	4,85	3,02	0,14	2,43	6,41	2,36	1,68	1,41	0,23	0,30	He	He	100,76

Примечание. 1, 2, 7—10, 14, 16 — пемзы с включениями импактитов 1-го рода; 5, 15 — черные пемзы, контактирующие с желтыми пемзами; 17 — черная пемза из включений в желтой пемзе.



Основные импактиты : массивные стекла и бомбы

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.л.л.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	41а	49,94	0,95	19,91	7,59	3,52	0,13	3,03	7,77	3,87	1,30	1,02	0,22	0,34	0,28	0,38	99,53
2	41д	51,15	0,90	19,77	6,70	2,42	0,15	3,35	7,07	4,00	1,27	1,07	0,29	0,44	0,36	0,38	99,50
3	42а	51,15	0,90	19,24	6,44	4,90	0,14	2,33	8,48	3,65	1,27	0,83	0,22	0,22	0,04	0,38	99,59
4	12а	51,38	0,95	17,72	2,90	6,60	0,19	4,90	6,92	3,35	1,29	3,35	0,22	0,00	He	He оуп.	99,77
5	41б	51,44	1,00	19,19	8,98	1,81	0,13	3,03	7,65	3,81	1,30	0,86	0,28	0,22	0,27	0,38	99,75
6	41ж	51,51	0,94	19,75	6,84	3,23	0,14	3,03	7,91	3,88	1,27	0,75	0,21	0,28	0,23	0,38	99,70
7	41г-2	51,51	0,90	19,91	6,99	3,03	0,13	3,25	8,48	3,29	1,23	0,10	0,77	0,22	0,10	0,01	99,72
8	41г-1	52,25	0,95	19,58	7,31	2,42	0,13	3,03	8,35	3,44	1,33	0,50	0,21	0,22	0,01	0,33	99,51
9	43а	52,42	0,86	20,62	6,43	2,77	0,10	2,04	9,51	2,27	1,25	1,37	0,27	0,47	0,00	0,99	99,91
10	41з	52,52	0,99	19,77	7,55	3,52	0,16	2,74	5,65	4,44	1,33	0,68	0,26	0,22	0,02	0,27	99,63
11	42б	52,52	0,90	20,02	6,00	2,42	0,13	2,77	8,48	3,37	1,50	1,07	0,22	0,26	0,28	0,49	99,68
12	42з	52,88	0,87	19,98	4,73	4,13	0,10	2,86	8,44	3,57	1,29	0,45	0,25	0,18	0,00	0,11	99,55
13	42и	53,11	0,82	19,96	5,91	2,98	0,10	2,66	8,83	2,64	1,29	0,80	0,25	0,43	0,24	2,20	99,59
14	Д5д	53,35	0,95	20,28	6,86	4,42	0,24	2,80	4,75	3,64	1,61	0,49	0,28	0,00	He	He оуп.	99,67
15	41е	53,35	0,95	19,42	7,19	3,23	0,15	3,35	5,37	4,50	1,38	0,49	0,26	0,16	0,02	0,33	99,66
16	42ж	53,35	0,85	19,59	5,56	3,50	0,14	2,22	7,07	3,41	1,81	0,80	0,21	0,28	0,01	0,44	99,52
17	12а-1	53,52	1,02	19,92	3,29	6,77	0,18	2,70	7,06	3,35	1,47	0,74	0,24	0,00	He	He оуп.	100,26
18	27б	53,78	0,82	19,41	4,77	4,09	0,11	3,06	7,38	4,00	1,67	0,83	0,26	0,19	0,08	0,00	100,26
19	27в	53,86	0,90	20,25	6,59	3,63	0,13	2,75	5,82	3,89	1,53	0,30	0,33	0,19	0,08	0,00	100,06
20	33к	54,14	0,78	18,38	4,01	4,70	0,14	3,21	7,24	3,66	1,70	1,61	0,29	0,13	0,00	0,16	99,86
21	13а	54,45	0,95	18,56	3,21	8,42	0,16	2,40	6,57	2,50	1,33	1,92	0,24	0,00	He	He оуп.	99,72
22	Д3	54,40	0,85	19,90	3,44	5,28	0,16	2,57	8,14	3,30	1,48	0,37	0,21	0,26	*	*	100,16
23	41в	54,54	0,90	19,07	6,32	3,52	0,14	2,64	5,65	4,50	1,41	0,58	0,22	0,40	0,03	0,38	99,52
24	45а-2	55,20	0,71	19,21	3,20	5,12	0,09	3,27	6,96	4,00	1,35	0,80	0,24	0,39	0,00	0,11	100,15
25	12г	55,35	0,88	18,56	4,10	5,37	0,14	2,60	7,49	2,60	1,67	0,74	0,27	0,00	He оуп.	He оуп.	99,78
26	33г	56,00	0,73	17,80	3,94	4,04	0,09	3,36	6,95	4,00	1,60	1,16	0,21	0,17	0,00	0,33	99,88
27	31и-1	57,46	0,80	18,06	2,48	5,06	0,10	3,17	6,25	4,29	1,37	0,18	0,26	0,16	0,07	0,00	99,48

Среднее

53,86

0,90

19,62

5,63

4,15

0,13

2,96

7,35

3,64

1,43

0,26

—

0,21

0,07

0,29

—

Примечание. 2, 7, 8, 10, 12, 13, 16, 18, 23, 24, 27 — образцы с мелкими включениями импактитов 1-го рода, остальные — без включений; 2, 4, 12, 18, 20, 23, 36 — образцы с участками и переходами в пемза-шлаки; 5, 12, 20, 21, 24 — образцы с пологими-навершиями.

включениями и пузырьками. Пределы вариаций состава разных стекол еще предстоит определить.

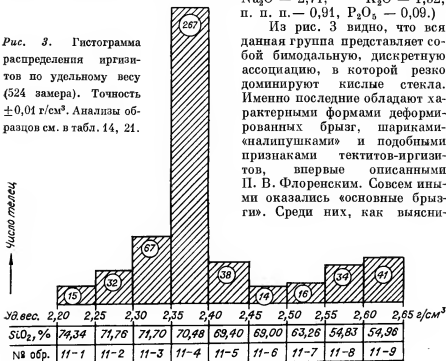
По химизму массивные основные импактиты не отличаются от описанных выше шлаков и пемз (табл. 13). Наиболее вероятный источник импактитов в мишени — вулканы — андезитобазальтового состава верхней толщи фундамента. Если не знать об их импактном происхождении, то их легко принять за обычные андезитобазальты.

Мелкие стеклянные тельца основного состава П. В. Флоренский на первых этапах своих исследований назвал основными иргизитами, вольно или невольно подчеркивая в самом названии их связь с кислыми иргизитами — наиболее близкими аналогами тектитов, с которыми они, однако, не имеют ничего общего. В последнее время П. В. Флоренский счел нужным заменить термин «основные иргизиты» на «брызги основного состава» и называть иргизитами только кислые тектиты.

Для выяснения вопроса о соотношениях между иргизитами и «основными брызгами» проба иргизитов из нашей коллекции была рассортирована по удельному весу на девять групп в специально приготовленных смесях бромоформа и диметилформамида (рис. 3). Из каждой группы для контроля по одному образцу было отдано на анализ (табл. 14). (Не вошел в таблицу из-за неясной принадлежности только анализ образца 11-7:  $\text{SiO}_2$  — 63,26,  $\text{TiO}_2$  — 0,78,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 14,35,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 1,35,  $\text{FeO}$  — 8,34,  $\text{MnO}$  — 0,17,  $\text{MgO}$  — 2,70,  $\text{CaO}$  — 4,20,  $\text{Na}_2\text{O}$  — 2,71,  $\text{K}_2\text{O}$  — 1,52, п. п. п. — 0,91,  $\text{P}_2\text{O}_5$  — 0,09.)

Из рис. 3 видно, что вся данная группа представляет собой бимодальную, дискретную ассоциацию, в которой резко доминируют кислые стекла. Именно последние обладают характерными формами деформированных брызг, шариками-«налипушками» и подобными признаками тектитов-иргизитов, впервые описанными П. В. Флоренским. Совсем иными оказались «основные брызги». Среди них, как выясни-

Рис. 3. Гистограмма распределения иргизитов по удельному весу (524 замера). Точность  $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$ . Анализы образцов см. в табл. 14, 21.



## Основные иргизиты

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
1	50,47	0,96	20,69	8,08	0,00	2,81	8,36	4,45	1,23	0,23
2	53,42	0,85	20,49	7,76	0,00	2,76	8,46	4,44	1,37	0,17
3	53,56	0,84	20,59	7,88	0,00	2,71	8,59	3,86	1,33	0,14
4	53,79	0,79	20,07	7,68	0,00	2,74	8,91	3,48	1,42	0,00
5	54,06	0,82	19,65	7,64	0,00	2,62	8,94	3,85	1,33	0,17
6	54,10	0,94	20,64	7,96	0,00	2,67	8,83	3,99	1,31	0,25
7	54,17	1,07	20,00	7,80	0,00	2,74	8,93	3,83	1,47	0,24
8	54,22	0,98	19,21	7,78	0,00	2,69	8,98	3,72	1,37	0,24
9	54,31	0,77	20,52	7,83	0,00	2,71	9,06	3,69	1,43	0,25
10	52,42	0,82	20,54	7,87	0,00	2,66	9,06	3,74	1,32	0,21
11	54,43	1,06	20,09	7,86	0,00	2,70	9,07	3,74	1,32	0,23
12	54,52	1,09	20,72	7,94	0,00	2,48	9,07	3,89	1,28	0,23
13	54,53	0,73	21,82	6,67	0,00	1,82	8,65	4,22	1,22	0,19
14	54,79	0,79	21,24	7,53	0,19	2,62	8,38	4,12	1,33	0,22
15	54,80	0,86	20,74	8,00	0,00	2,72	8,24	4,40	1,29	0,24
16	54,83	0,80	19,30	3,50	0,16	2,40	8,11	3,30	1,81	0,20
17	54,95	0,80	19,76	7,03	0,00	2,89	8,11	3,76	1,57	0,25
18	54,96	0,95	17,89	8,75	0,19	3,00	5,56	3,75	1,59	0,16
19	55,07	1,04	20,90	8,15	0,00	2,94	8,23	4,37	1,22	0,24
20	55,84	0,83	19,76	6,93	0,00	3,00	8,01	3,74	1,68	0,25
21	56,73	0,77	19,61	6,88	0,00	3,12	7,91	3,72	1,75	0,24
Среднее	54,31	0,88	20,21	7,50	0,02	2,70	8,45	3,90	1,44	0,20

Примечание. 16 — обр. 11-9 Э. П. Исоха (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 5,42%, п. п. п. — 0,30%); 18 — обр. 11-8 Э. П. Исоха (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 2,19%, п. п. п. — 0,96%). Все остальные анализы принадлежат П. В. Флоренскому.

лось, преобладают мелкие, неправильной формы фрагменты более крупных тел основных импактитов, тогда как тельца правильной аэродинамической формы (сферы, капли, эллипсоиды, гантельки) чрезвычайно редки (фото 14). Например, чтобы «добыть» 20 г, т. е. 30—40 таких телец, понадобилось осадить в тяжелой жидкости более 2 кг, т. е. тысячи иргизитов, собранных в том же месте, где их собирал и П. В. Флоренский. Важно подчеркнуть, что «основные брызги» ничем, кроме размеров, не отличаются от основных импактитов-жаманшинитов. Это всего-навсего мелкие лапилли, если продолжать аналогию с вулканическими образованиями.

К умеренно кислым импактным стеклам относятся преимущественно ярко- или бледно-желтые, реже буроватые и белесые пемзы, лишь в единичных случаях образующие отдельные бомбы (фото 12), обычно же встречающиеся в виде смесей с тектитами-жаманшинитами (фото 13—15), изредка — с черными основными пемзами (фото 16).

Иногда желтые пемзы перемежаются с полосками, пятнами или жилкообразными обособлениями такого же желтого или бледно-желтого (но не черного, как в теклитах) стекла, не отличающегося от пемз по составу (табл. 15).

Импактитов 1-го рода, отвечающих по составу рассматриваемым пемзам, не обнаружено, однако поиски их нужно продолжать. Единичные находки близких к ним пород, которые заслуживают упоминания, представляют собой четко очерченные включения в тектит-жаманшинит плотной беловатой бесструктурной породы, переходящей в тонкопузырчатую «пену» или пемзу (фото 17). Природа включений неясна. Не найдено в них и в желтых пемзах каких-либо реликтов исходных пород и минералов — индикаторов происхождения.

Вещественных аналогов желтым пемзам среди пород фундамента не обнаруживается. По химизму (см. табл. 8, 15) они близки только к рыхлому материалу насыпного вала, т. е. к существенно глинистым породам осадочного чехла. Думается, что плавлением последних можно объяснить и высокую газонасыщенность расплава, определяющую образование именно (и только) пемз, и соотношения пемз с другими импактитами и тектитами. Если это предположение подтвердится, то необходимо будет разработать иную модель ударно-взрывного процесса.

Кислые импактиты 2-го рода в Жаманшине крайне редки и самостоятельных масс на поверхности не образуют. К ним могут быть отнесены находки лешательерита в ударно-метаморфизованном жильном кварце, упоминаемые П. В. Флоренским [19]. Следует заметить, что за лешательерит, судя по высказываниям Я. И. Бойко, ранее принимали желтоватые и белесые пемзы, однако после анализа все они оказались умеренно кислыми породами из группы желтых пемз.

Наблюдаемое отсутствие самостоятельных проявлений кислых расплавных импактитов, происходящих из широко распространенных в фундаменте кремнистых пород нижней толщи, по-видимому, не случайно. Как уже говорилось выше, пока нет достоверных свидетельств образования из той же толщи и основных расплавных импактитов. В совокупности эти данные свидетельствуют о том, что очаг ударного плавления располагался в верхней толще  $C_1$  — либо в пределах соответствующего тектонического блока, либо стратиграфически (гипсометрически) выше нижней толщи. Ударный метаморфизм, обусловивший образование импактитов 1-го рода, напротив, явно захватывал обе толщи, т. е. более обширную область.

**Тектиты-жаманшиниты.** Кислые стекла тектитового облика и состава встречаются по всему периметру астроблемы, образуя ареалы как отдельные, так и смешанные с основными импактитами. Какой-либо зависимости их распространения от состава аллогенной брекчии или импактитов не установлено. Внешне рассматриваемые породы неотличимы от австрало-азиатских тектитов типа Муонг-Нонг (т. е. не имеющих правильной формы). Сходство тектитов Жаманшина и Вьетнама поразительно, и это обстоятельство уже было отмечено [8, 26]. Именно по этой причине мы вправе называть кислые жаманшиниты собственно тектитами, независимо от того, как будет решаться вопрос об их происхождении.

Необходимо отметить, что в Жаманшине нет знаменитых своей совершенной азродинамической формой и загадочной скульптурой

нормальных тектитов, широко распространенных в других тектитовых полях мира (иргизиты при этом не должны приниматься в расчет, поскольку от нормальных тектитов они принципиально отличаются и формой, и составом). В то же время следует иметь в виду, что в Австрало-Азиатском тектитовом поле, судя по литературным источникам и опыту автора [7], известны отдельные ареалы и местонахождения тектитов, в которых встречаются тектиты одного только типа Муонг-Нонг. Примерами могут служить район д. Муонг-Нонг в Лаосе, где впервые были обнаружены тектиты данного типа [28], некоторые места в Таиланде [22], район г. Дананг во Вьетнаме [7] и др. Поэтому возможность локального выпадения тектитов только одного типа Муонг-Нонг вполне реальна.

Сравниваемые тектиты имеют одинаковый глубокий черный цвет и просвечивают в тонких сколах коричневым или бурым. В тех и других отмечаются более светлые разводы (фото 18, 19), представляющие собой участки крайне тонкопузырчатой пемзы или плотной «пены», имеющей тот же состав, что и массивное стекло (табл. 16, 17). В обоих районах распространены слоистые стекла с пустотами — путями продвижения газовых пузырей (фото 20, 21), бомбы или фрагменты бомб с пloyчатым рисунком слоистости (фото 22, 23), с крупными сквозными кавернами (см. фото 15, 24), а также с поверхностью типа «хлебной корки» (фото 25—27).

Неотличимы сравниваемые тектиты и под микроскопом. Они имеют так называемую игнимбритовую флюидальную текстуру, т. е. состоят из полосок и линз или «хлопьев» различно окрашенных стекол, от буроватых до бесцветных. В свою очередь, все эти стекла образованы очень тонкими волокнами, слегка различающимися по преломлению и хорошо видимыми благодаря дисперсионному эффекту. Заметим, что точно такая же тонковолокнистая структура присуща и нормальным тектитам-индошпинитам, имеющим форму распада расплавных струй. Поэтому данная структура не может быть результатом спекания более мелких телец, подобно типичным игнимбрикам (сваренным туфам), а, скорее всего, является следствием ликвации.

По общему химическому составу тектиты типа Муонг-Нонг Вьетнама и Жаманшина чрезвычайно близки, если не считать некоторой обогащенности вьетнамских тектитов магнием (см. табл. 16—19, рис. 5). По предварительным данным [11], они также весьма близки по содержанию редких и рассеянных элементов и редких земель. Наконец, они имеют практически один и тот же абсолютный возраст — около 600—800 тыс. лет [6, 20].

Среди пород фундамента прямых вещественных аналогов тектитов не зафиксировано. Ими могут быть либо некоторые порфиroidы (см. табл. 5), либо кремнисто-глинистые сланцы, упоминаемые в описаниях разреза нижней толщи, но пока не встреченные среди обломков аллогенной брекчии. Кислые пемзы, которые во всем ряду пород Жаманшина ближе всего стоят к тектитам, единичны и, как считает В. Л. Масайтис, связаны с импактитами 1-го рода по кремнистым сланцам (табл. 20). Этот вопрос требует дальнейшего изучения. Однако уже сейчас можно сказать, что вероятность получения

Желтые пензы

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	45в-1	64,12	1,41	20,05	0,50	7,60	0,10	1,02	0,85	1,35	2,12	0,84	0,17	0,00	0,00	0,41	99,83
2	37в-2	64,28	1,02	19,90	1,06	6,36	0,14	1,31	0,85	1,23	2,68	0,79	0,15	0,09	0,00	0,11	99,94
3	Д-5а	66,00	0,95	16,08	0,82	8,01	0,85	1,80	0,42	1,10	1,88	1,38	0,20	0,00	0,00	0,00	99,51
4	39г	66,36	1,25	17,72	1,18	6,68	0,10	1,02	1,84	1,35	1,86	0,40	0,18	0,03	0,09	0,41	100,00
5	30д	66,40	0,88	16,19	1,63	2,56	0,25	1,32	2,13	0,55	3,72	3,78	0,20	0,16	0,24	0,99	99,85
6	37е	66,44	0,90	17,04	0,79	7,85	0,13	1,22	1,56	1,42	2,45	0,06	0,15	0,23	0,09	0,00	100,10
7	Д56	66,66	0,95	14,18	0,69	7,23	0,15	4,30	1,26	1,40	2,44	0,80	0,11	0,00	0,00	0,00	99,59
8	Д5в	66,68	1,13	17,89	0,18	6,73	0,16	1,20	0,98	1,25	2,57	0,73	0,13	0,00	0,00	0,00	99,66
9	36г	67,42	1,02	18,05	0,75	5,86	0,10	1,22	0,85	1,38	2,76	0,64	0,17	0,00	0,00	0,41	100,22
10	30в	67,80	0,84	15,19	0,66	6,81	0,13	1,22	1,98	0,45	2,82	0,95	0,19	0,29	0,66	0,55	99,70
11	32ж	68,78	1,06	15,20	1,49	5,33	0,08	1,02	1,14	1,50	2,50	1,23	0,19	0,28	0,00	0,00	99,52
Среднее ...		67,38	1,02	17,27	0,88	6,53	0,19	1,53	1,27	1,46	2,53	—	0,16	0,09	0,09	0,18	—

Примечание. 1 — включение желтоватой плотной породы, переходящей в пензу, в тектито-жаманините (см. фото 13); 2, 11 — крупные участки пензы в тектите-жаманините (как на фото 14); 3, 6, 8, 10 — пензы с полосками стекла; 9 — бомба (см. фото 12); 4, 5, 7 — отдельные обломки.

Тектиты-жаманиниты

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	Сумма
1	20б	72,10	0,58	10,46	1,06	8,26	0,11	0,80	1,41	1,75	2,73	0,54	0,14	0,00	99,65
2	30а	72,76	0,67	11,98	0,92	5,62	0,11	0,81	1,42	1,78	3,00	0,11	0,21	0,11	98,39
3	6-1	72,94	0,73	12,96	0,46	5,04	0,16	1,10	0,95	1,87	2,86	0,35	0,03	0,00	99,65
4	12е	73,00	0,70	10,10	1,35	6,07	0,12	1,11	1,41	1,75	2,86	1,36	0,44	0,00	99,69
5	4	73,50	0,68	12,49	0,70	4,12	0,10	1,20	1,49	1,87	3,00	0,46	0,11	0,00	99,91
6	37к	73,80	0,62	11,69	0,97	5,54	0,10	0,51	1,42	1,78	2,81	0,14	0,15	0,19	99,53
7	2е	73,82	0,80	13,33	0,79	4,13	0,11	0,90	0,95	1,56	2,66	0,45	0,03	0,00	99,55
8	23-4	74,17	0,70	13,10	0,34	4,20	0,13	0,95	0,91	2,05	3,00	0,48	0,16	0,20	100,39

9	226	74,20	0,67	42,32	0,29	5,33	0,15	0,70	1,41	1,80	3,10	0,00	0,14	0,00	99,83
10	10в	74,50	0,73	10,80	0,05	7,43	0,12	0,50	0,95	1,50	2,53	0,82	0,06	0,00	99,99
11	10г	74,50	0,73	11,30	0,53	5,90	0,13	1,00	0,95	1,62	2,53	0,94	0,02	0,00	99,85
12	8	74,56	0,65	10,62	0,65	5,45	0,12	1,20	0,95	1,87	2,86	0,70	0,06	0,00	99,69
13	11-5г	74,58	0,66	11,81	0,39	4,75	0,15	1,00	0,91	1,75	2,93	0,50	0,15	0,00	99,60
14	20-2	74,60	0,60	11,50	0,32	4,28	0,09	0,86	1,09	1,87	2,81	0,72	0,11	0,08	98,93
15	31ж	74,60	0,71	11,31	1,47	4,17	0,08	1,02	1,14	1,71	3,00	0,12	0,18	0,15	99,51
16	12с	74,70	0,65	12,20	0,83	4,02	0,12	0,90	0,76	1,80	2,75	0,45	0,14	0,04	99,36
17	2г	74,80	0,57	11,30	2,36	3,51	0,09	0,95	0,61	2,14	3,23	0,38	0,00	0,00	99,94
18	22а	74,80	0,66	11,48	0,13	5,20	0,12	1,20	0,98	1,95	3,10	0,00	0,13	0,00	99,78
19	7-6	74,83	0,75	13,00	0,25	4,46	0,09	0,84	0,96	1,71	2,33	0,27	0,10	0,16	99,75
20	23а	74,88	0,68	12,21	0,72	4,42	0,11	1,00	0,77	1,80	3,00	0,10	0,11	0,00	99,82
21	10е-2	74,90	0,67	12,30	0,72	3,88	0,10	0,85	0,66	1,70	2,50	0,43	0,09	0,06	98,83
22	6-2	75,02	0,65	11,47	0,30	4,87	0,10	0,85	1,22	1,85	3,10	0,53	0,22	0,00	100,18
23	7-4	75,17	0,75	12,40	0,69	3,88	0,09	0,70	0,91	1,75	2,45	0,55	0,10	0,18	99,62
24	19-3	75,20	0,66	11,14	1,02	5,00	0,11	0,90	0,84	1,75	2,73	0,07	0,13	0,00	99,57
25	31е	75,50	0,65	10,98	0,83	4,30	0,06	1,12	0,99	1,79	3,00	0,12	0,16	0,14	99,47
26	31а	75,56	0,66	10,63	0,86	5,00	0,08	0,92	0,99	1,64	2,90	0,59	0,17	0,39	100,13
27	45б	75,57	0,65	10,69	0,46	5,08	0,07	0,92	0,85	1,94	2,96	0,56	0,16	0,20	99,81
28	2ж	75,60	0,55	11,50	0,05	4,10	0,09	0,84	1,10	1,89	2,91	0,44	0,21	0,16	99,44
29	12-3	75,67	0,60	11,20	0,10	5,31	0,11	0,80	0,80	1,82	2,52	0,45	0,12	0,20	99,70
30	37-п	75,76	0,42	9,52	1,63	5,20	0,09	0,51	1,28	1,74	2,64	0,42	0,18	0,47	99,39
31	23в	76,00	0,60	11,81	0,52	4,00	0,12	1,00	0,84	1,80	2,87	0,44	0,12	0,00	100,20
32	2-5	76,15	0,50	11,20	0,15	3,92	0,08	0,80	0,91	2,00	2,91	0,52	0,14	0,26	99,54
33	2а	76,17	0,60	12,10	0,20	4,02	0,09	0,70	0,80	1,89	3,00	0,49	0,18	0,16	100,40
34	7-3	76,30	0,55	11,75	0,14	4,38	0,14	0,81	0,87	1,86	2,81	0,49	0,12	0,14	100,36
35	20в	76,42	0,56	10,13	1,24	4,01	0,12	0,90	0,77	1,80	3,00	0,44	0,10	0,00	99,51
36	31а	76,48	0,56	10,72	0,59	4,46	0,05	0,82	0,85	1,86	3,07	0,42	0,14	0,09	99,64
37	20-1	76,60	0,55	10,50	0,27	4,17	0,08	0,76	0,76	1,90	2,81	0,40	0,09	0,00	98,91
38	12-2	76,60	0,58	10,50	0,45	4,06	0,09	0,80	0,74	1,87	2,75	0,33	0,10	0,04	98,91
39	10-2	76,90	0,50	10,40	0,63	3,88	0,09	0,71	0,56	1,83	2,75	0,35	0,09	0,06	98,81
40	22-3	77,06	0,60	11,00	0,07	4,17	0,08	0,76	0,87	1,96	3,00	0,44	0,11	0,16	100,28
41	10е-1	77,40	0,56	10,40	0,66	4,02	0,09	0,71	0,54	1,83	2,75	0,15	0,09	0,02	99,22
42	2-4	77,60	0,50	10,70	0,12	3,77	0,07	0,70	0,73	1,96	2,90	0,40	0,10	0,08	99,63
Среднее ...		75,73	0,63	11,50	0,63	4,74	0,10	0,87	0,94	1,83	2,86	—	0,12	0,08	—

Примечание. 3,28 — стекла с голубоватыми участками; 8—10, 20, 21, 29, 33 — стекла с участками «пенны»; 15, 27, 30 — стекла с «вихревыми» полостями. Остальные образцы — черные массивные или слабопузырьчатые стекла.

Тектиты типа Муонг-Нонг (Вьетнам)

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	ΣFeO	Сумма
1	11-1	79,40	0,63	9,60	3,94	0,08	1,46	1,10	1,31	2,06	0,09	0,00	3,94	99,37
2	A55-1	72,00	0,79	12,20	5,62	0,08	2,79	1,92	1,50	2,25	0,06	0,00	5,62	99,21
3	A65-1	74,80	0,78	11,37	4,74	0,07	2,00	1,85	1,56	2,25	0,11	0,00	4,74	99,63
4	A65-3	73,69	0,72	12,12	4,49	0,08	2,03	2,33	1,08	2,41	0,08	0,00	4,49	99,03
5	A73-1	73,20	0,84	13,20	5,09	0,00	1,77	0,91	1,38	2,69	0,14	0,00	5,09	99,30
6	A81-4a	76,10	0,77	10,70	3,77	0,10	1,54	1,21	1,43	2,50	0,11	0,36	4,03	98,92
7	A81-4b	76,10	0,68	10,90	3,66	0,09	1,55	1,45	1,43	2,50	0,09	0,25	4,20	99,34
8	A81-2	75,10	0,72	11,30	4,24	0,10	1,60	1,27	1,43	2,44	0,09	0,43	4,54	99,11
9	A81-6	75,10	0,68	10,90	4,35	0,10	1,58	1,36	1,50	2,44	0,09	0,30	4,73	98,86
10	A81-7	74,80	0,70	11,40	4,06	0,09	1,76	1,65	1,43	2,44	0,08	0,45	4,68	99,67
11	A81-8	74,10	0,75	11,60	3,95	0,09	1,81	1,70	1,57	2,44	0,08	0,56	4,65	99,59
12	A81-12	73,20	0,72	12,00	4,49	0,10	1,86	1,76	1,60	2,50	0,09	0,32	5,02	99,31
13	A82-1	77,40	0,60	9,90	3,88	0,11	1,38	1,32	1,40	2,31	0,08	0,43	4,37	99,35
14	A83-1	76,80	0,66	10,20	3,95	0,09	1,45	1,21	1,40	2,25	0,08	0,44	4,33	99,02
Среднее ...		75,12	0,71	11,24	4,30	0,09	1,73	1,50	1,43	2,39	0,09	—	4,60	—

Примечание, 6 — плотное стекло; 7 — тонкопузырчатая «пена» в том же образце.

Тектиты Вьетнама, слоистые сферы

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	ΣFeO	Сумма
1	9-1	73,60	0,79	12,80	4,70	0,08	1,76	1,78	1,50	2,50	0,10	0,00	4,70	99,61
2	12-1	73,20	0,81	12,60	5,20	0,08	1,84	1,78	1,63	2,50	0,11	0,00	5,20	99,75
3	19-1	74,60	0,80	12,40	4,74	0,08	1,86	2,20	1,44	2,13	0,07	0,00	4,74	99,38
4	33-5	74,56	0,73	12,49	4,45	0,09	1,72	2,43	1,12	2,49	0,06	0,01	4,45	100,14
Среднее ...		73,99	0,78	12,57	4,77	0,08	1,79	2,04	1,42	2,40	0,08	—	4,77	—



Тектиты-индоиниты правильной формы

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	ΣFeO	Сумма
1	1	72,40	0,78	12,30	0,00	6,04	0,40	2,64	1,57	1,25	2,25	0,40	0,00	6,04	99,43
2	7-1	73,70	0,79	12,30	0,00	4,59	0,08	1,76	1,76	1,63	2,50	0,09	0,00	4,59	99,20
3	8-1	74,20	0,80	12,20	0,00	4,36	0,07	1,76	1,85	1,56	2,50	0,11	0,00	4,36	99,41
4	10-1	74,90	0,78	12,20	0,00	4,54	0,07	1,79	1,92	1,56	2,50	0,09	0,00	4,54	100,32
5	18-1	73,90	0,79	12,50	0,00	4,55	0,08	1,90	2,06	1,56	2,25	0,03	0,00	4,55	99,62
6	24-1	74,60	0,79	12,70	0,00	4,89	0,09	1,86	2,36	1,49	2,13	0,05	0,00	4,89	100,66
7	29-2	74,31	0,73	12,51	0,00	4,42	0,09	1,77	2,70	0,78	2,25	0,05	0,00	4,42	99,82
8	30-1	75,20	0,85	12,50	0,00	4,59	0,09	1,79	1,92	1,43	2,13	0,05	0,00	4,59	100,25
9	A-81c	71,20	0,78	13,40	0,38	4,49	0,40	2,08	2,24	1,70	2,75	0,07	0,44	4,83	99,39
10	A-81-16	70,80	0,78	12,90	0,85	4,81	0,09	2,40	2,25	1,67	2,50	0,08	0,54	5,58	99,45
11	A-81-18	72,47	0,80	11,90	0,00	5,98	0,40	1,84	1,50	1,57	2,45	0,40	0,56	5,98	99,33
12	A-81-21	71,50	0,77	12,70	0,64	4,60	0,09	2,05	2,11	1,70	2,50	0,08	0,25	5,18	99,05
Среднее ...		73,24	0,78	12,48	0,15	4,81	0,08	1,94	2,02	1,44	2,39	0,07	—	4,96	—

Кислые пемзы

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	38ж	68,12	0,70	11,13	0,67	5,45	0,09	1,53	2,69	1,35	2,36	5,48	0,17	0,46	0,40	1,98	99,84
2	32д	69,50	0,90	12,74	1,11	6,07	0,15	2,04	2,13	1,20	2,86	4,03	0,28	0,25	0,00	0,00	100,01
3	32г	70,86	0,88	12,07	1,96	5,02	0,41	1,74	1,99	1,20	2,71	0,97	0,25	0,17	0,01	0,00	99,77

## Иргизиты

№ п/п	№ образ- ца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	И.л.л.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣFeO	Сумма
1	11-6	69,00	0,87	10,46	1,39	0,15	4,00	2,71	1,37	1,82	0,77	0,04	8,41	99,64
2	T	69,06	0,96	12,61	2,74	0,10	2,67	2,26	1,75	1,90	2,59	0,20	5,80	100,03
3	11-5	69,40	0,80	10,46	1,29	0,15	3,20	2,17	1,37	2,13	0,86	0,05	9,11	99,73
4	T	70,34	0,83	11,75	2,39	0,15	3,10	3,31	1,75	1,83	0,00	0,14	7,00	100,48
5	T	70,36	0,77	11,24	2,44	0,18	3,40	3,02	1,67	1,83	0,00	0,11	7,05	99,86
6	11-4	70,48	0,90	9,62	1,37	0,13	5,36	3,92	1,00	1,82	0,93	0,03	8,19	99,64
7	11-3	71,70	0,90	10,26	1,65	0,15	2,90	2,03	1,12	2,00	0,71	0,05	7,99	99,91
8	11-2	71,76	0,90	10,46	0,41	0,15	2,40	1,50	1,25	2,13	0,84	0,11	8,19	99,63
9	T	72,44	0,70	10,72	1,80	0,18	3,40	2,87	1,33	1,83	0,00	0,10	6,74	100,43
10	11-с	72,70	0,78	9,90	1,89	0,10	3,24	2,73	1,17	1,86	0,40	0,03	6,06	99,40
11	T	73,94	0,57	11,52	1,49	0,10	1,39	1,29	1,82	2,67	0,43	0,26	5,15	99,23
12	T	74,19	0,55	9,70	1,97	0,12	3,25	2,08	1,61	1,42	1,06	1,15	5,52	99,78
13	11-1	74,34	0,82	11,47	0,23	0,12	1,30	0,95	1,87	2,80	0,62	0,18	5,60	100,06
14	3Д	74,40	0,82	10,50	1,82	0,10	2,64	2,74	1,25	1,86	0,00	0,12	5,82	100,46
15	11а	74,90	0,85	11,98	1,05	0,13	1,05	0,47	1,68	2,60	0,50	0,07	5,60	99,90
16	T	72,01	0,78	15,55	He onp.	He onp.	1,11	0,55	1,10	2,83	He onp.	0,00	He onp.	99,43
17	Φ	72,03	0,85	10,13	»	»	3,75	2,58	1,00	1,58	»	0,04	»	98,46
18	Φ	72,15	0,82	9,77	»	»	3,59	2,80	0,96	1,62	»	0,00	»	98,20
19	Φ	72,95	0,69	9,72	»	»	3,18	2,41	1,15	2,01	»	0,03	»	98,35
20	Φ	73,00	0,79	9,82	»	»	3,20	2,68	1,06	1,83	»	0,02	»	98,46
21	Φ	73,11	0,84	9,92	»	»	3,50	2,85	0,99	1,66	»	0,01	»	99,26
22	Φ	73,32	0,72	9,99	»	»	3,69	2,43	0,85	1,74	»	0,00	»	99,23
23	Φ	73,51	0,82	10,21	»	»	2,57	2,55	1,16	2,11	»	0,05	»	98,20
24	Φ	73,59	0,82	10,21	»	»	2,60	2,48	1,13	2,14	»	0,02	»	98,53

25	Ф	73,61	0,82	10,23	*	5,53	*	2,60	2,48	1,13	2,44	*	0,02	*	98,57
26	Т	73,80	0,78	10,07	*	6,04	*	3,31	2,39	0,76	1,98	*	0,00	*	99,13
27	Ф	73,91	0,93	10,30	*	5,46	*	2,72	2,60	1,09	2,06	*	0,08	*	99,15
28	Т	74,01	0,93	9,91	*	5,13	*	2,41	2,40	1,22	1,96	*	0,02	*	97,97
29	Ф	74,01	0,85	10,35	*	5,46	*	2,70	2,58	1,10	2,08	*	0,05	*	99,18
30	Ф	74,06	0,97	9,64	*	5,58	*	2,70	2,35	1,04	1,88	*	0,01	*	98,22
31	Ф	74,12	0,83	9,67	*	5,48	*	2,74	2,42	1,15	1,97	*	0,01	*	98,36
32	Ф	74,16	0,76	10,45	*	5,16	*	2,64	2,32	1,09	1,98	*	0,02	*	98,60
33	Ф	74,17	0,81	10,24	*	5,54	*	2,87	2,45	1,15	1,91	*	0,02	*	99,16
34	Ф	74,12	0,72	9,78	*	5,31	*	2,70	2,43	1,14	2,09	*	0,02	*	98,40
35	Ф	74,23	0,86	10,44	*	5,47	*	2,72	2,62	1,12	2,12	*	0,05	*	99,63
36	Ф	74,24	0,78	10,24	*	5,52	*	2,65	2,70	1,09	1,99	*	0,04	*	99,24
37	Ф	74,28	0,84	9,79	*	5,43	*	2,66	2,25	1,03	2,02	*	0,00	*	98,30
38	Ф	74,28	0,78	10,16	*	5,60	*	2,93	2,36	0,97	0,00	*	0,00	*	99,04
39	Ф	74,32	0,80	10,09	*	5,36	*	2,68	2,44	1,09	2,03	*	0,02	*	98,79
40	Ф	74,34	0,77	10,22	*	5,22	*	2,47	2,63	1,19	2,03	*	0,07	*	98,95
41	Ф	74,35	0,80	10,22	*	5,48	*	2,79	2,50	1,11	2,01	*	0,02	*	99,28
42	Ф	74,39	0,86	10,00	*	5,62	*	0,41	2,70	2,50	1,06	*	1,94	*	99,20
43	Ф	74,40	0,80	10,35	*	5,64	*	0,10	2,78	2,46	1,12	*	2,13	*	99,79
44	Ф	74,42	0,82	10,00	*	5,43	*	2,68	2,41	1,10	1,98	*	0,03	*	98,87
45	Ф	74,44	0,88	10,03	*	5,47	*	2,76	2,35	1,05	1,88	*	0,02	*	98,89
46	Ф	74,51	0,78	10,43	*	5,41	*	2,76	2,57	1,08	2,00	*	0,07	*	99,60
47	Ф	74,60	0,69	10,23	*	5,49	*	2,84	2,49	1,09	1,90	*	0,01	*	99,31
48	Ф	74,66	0,76	9,98	*	5,46	*	2,66	2,30	1,06	2,05	*	0,00	*	98,93
49	Ф	74,76	0,87	10,19	*	5,68	*	2,79	2,52	1,12	1,83	*	0,00	*	99,75
50	Ф	74,91	0,81	10,40	*	5,57	*	2,76	2,42	1,08	2,02	*	0,04	*	100,00
51	Ф	75,55	0,88	10,47	*	5,51	*	2,71	2,63	1,18	2,03	*	0,02	*	100,98
52	Ф	77,14	0,82	9,45	*	4,24	*	2,16	1,75	1,04	2,10	*	0,04	*	98,75

Примечание. 16-52 — неполные анализы; Ф — анализы выполнены П. В. Флоренским; Т — С. Тейлором, С. Мак-Ленном [31].

тектитов-жаманшинитов из пород мишени мала. Примечательно, что в них нет никаких реликтов или включений пород фундамента, и этим кислые жаманшиниты резко отличаются от основных жаманшинитов, импактная природа которых вполне очевидна.

По составу наиболее близки к тектитам современные лессовидные суглинки (см. табл. 9). Их сходство рассматривалось в связи с проблемой происхождения тектитов [26, 29, 31 и др.]. Однако какого-либо механизма, объясняющего строго избирательное плавление тонкого почвенного покрова в результате ударного плавления, до сих пор не предложено. Для Жаманшина такой механизм представляется маловероятным.

**Тектиты-иргизиты.** Как уже сказано, эта группа должна быть ограничена только кислыми стеклами специфической формы и состава. Она обстоятельно описана ранее [17—19, 23, 24, 26, 27, 31, 32], что позволяет ограничиться лишь несколькими замечаниями и соображениями.

По сложившемуся мнению, иргизиты отличаются от устойчивого мирового типа тектитов повышенным содержанием окисного железа и воды, что в какой-то мере сближает их с импактатами. Именно эта их черта позволяет допускать возможность вторичного выплавления иргизитов из тектитов-жаманшинитов, что как будто подтверждают наблюдаемые в последних своеобразные полости, условно названные нами «вихревыми кавернами выдувания», в которых иногда видны отростки, по форме чрезвычайно похожие на иргизиты в «момент зарождения» (см. фото 14, 28, 29). Однако те и другие образования предстоит проверить, прежде чем выносить окончательное суждение.

Хотя иргизиты и близки по составу к тектитам-жаманшинитам, но систематически отличаются от них более высоким содержанием магния (табл. 21), никеля и кобальта [23, 31 и др.]. По этому признаку они приближаются к тектитам Вьетнама (см. табл. 16—18) и особенно к некоторым яванитам и филиппинитам [32]. Этот признак может оказаться первичным, и тогда надо будет доказывать самостоятельное происхождение иргизитов как тектитов, попавших в какие-то особые условия. Если же справедливым окажется предположение о вторичном их выплавлении из тектитов, тогда придется допустить, что они выплавлялись под влиянием газовых (плазменных) струй, насыщенных Mg, Ni и Co.

**Такситы.** К такситам мы отнесли макроскопически различные, но неразделимые смеси разных стекол, полосчатые или пятнистые. Более грубо построенные такситы, в которых разный материал четко обособлен и может быть взят для анализа, уже были рассмотрены выше. Данные породы еще предстоит детально изучить с помощью микронзондового и других тонких методов. Мы ограничиваемся лишь внешней характеристикой и петрохимическими данными.

Такситы основного и среднего состава встречены только на севере астроблемы (точки 33, 43, 45). Они представляют собой бомбы с хорошо различимыми матовым и блестящим стеклами. Последнее часто образует поверхностную оболочку с характерным рисунком трещин «усыхания» или «хлебной корки». Встречаются отдельные

Таксты основного — среднего состава

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	43а-2	52,53	0,86	20,37	6,08	2,94	0,11	2,25	9,57	2,64	1,23	0,52	0,25	0,25	0,20	0,22	99,55
2	43а-1	52,71	0,89	20,12	6,37	2,57	0,11	2,86	9,27	2,43	1,28	0,49	0,28	0,45	0,26	0,33	99,64
3	33а-2	53,16	0,91	19,56	4,03	4,31	0,10	3,06	7,24	4,00	1,72	1,51	0,27	0,28	0,25	0,22	100,44
4	33ж-2	54,76	0,78	18,38	4,94	3,30	0,10	3,26	7,24	3,77	1,53	1,17	0,22	0,08	0,29	0,22	99,74
5	33а-1	54,98	0,88	17,89	5,57	5,88	0,12	2,76	5,62	3,03	1,61	1,54	0,30	0,36	0,16	0,33	100,34
6	33л-2	55,46	0,78	18,21	3,59	5,24	0,12	3,26	7,10	3,60	1,50	0,69	0,23	0,12	0,08	0,11	99,86
7	33з-2	55,70	0,63	17,54	2,45	6,27	0,09	3,67	6,95	3,80	1,50	0,99	0,21	0,01	0,03	0,38	99,83
8	33а-1	55,78	0,63	17,03	2,06	6,23	0,10	3,67	7,81	4,00	1,40	0,68	0,23	0,00	0,36	0,38	99,98
9	13-2	55,73	0,90	20,10	3,89	4,50	0,15	2,45	7,85	2,73	1,41	0,57	0,19	0,26	0,00	0,00	100,73
10	23г	55,81	0,68	17,38	2,85	8,42	0,18	2,90	6,01	3,71	1,47	0,92	0,21	0,00	0,00	0,00	99,54
11	45а-1	56,46	0,73	16,87	1,93	6,98	0,09	3,06	6,53	4,00	1,44	0,77	0,23	0,13	0,00	0,22	100,29
12	33е	58,10	0,68	17,54	3,62	3,88	0,11	3,36	6,39	3,55	1,60	0,75	0,21	0,10	0,01	0,28	99,80
13	33ж-1	58,16	0,61	16,19	2,07	7,35	0,10	3,16	6,25	3,55	1,20	0,92	0,21	0,02	0,03	0,27	99,80
14	33м	58,64	0,66	17,37	0,50	6,69	0,10	3,46	6,10	4,50	1,48	0,73	0,21	0,00	0,00	0,11	99,84
15	3	59,10	0,95	18,90	3,88	4,25	0,16	2,10	5,43	2,29	1,71	0,92	0,28	0,00	0,00	0,00	99,97
16	33а-3	59,36	0,63	17,71	2,33	7,70	0,08	3,16	5,68	4,62	1,33	0,52	0,22	0,23	0,00	0,16	100,34
Среднее ...		56,53	0,76	18,48	3,54	5,26	0,11	3,03	7,00	3,54	1,45	—	0,23	0,45	0,10	0,20	—

Примечание. 1, 3—5, 7, 12 — матовое стекло в середине бомб; 2, 8, 11, 13 — блестящее стекло из корки бомб; 6, 9, 10, 14—16 — полочатое чередование матового и блестящего стекла.

Умеренно кислые такситы

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.л.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	37р-1	58,52	1,30	23,54	1,75	8,30	0,14	1,43	1,43	0,83	1,40	1,45	0,15	0,42	0,47	0,00	100,44
2	46г-2	60,26	1,15	22,32	2,24	7,80	0,09	0,92	0,99	1,19	2,04	0,86	0,17	0,23	0,02	0,11	100,05
3	19-1	61,80	0,90	18,56	1,33	8,26	0,18	1,20	1,96	2,00	2,37	0,60	0,15	0,00	0,00	0,00	99,53
4	39а-2	63,44	1,12	17,05	1,97	5,94	0,10	1,22	4,68	1,07	1,13	1,83	0,17	0,24	0,36	1,43	100,08
5	40в-2	65,14	1,05	16,37	2,86	5,53	0,10	1,33	2,55	1,61	1,77	1,02	0,15	0,12	0,03	0,49	99,51
6	19-5	66,40	0,89	15,15	1,00	8,14	0,37	1,80	1,26	1,50	2,50	0,44	0,20	0,00	0,00	0,00	99,64
7	36д	66,80	0,85	15,85	1,34	6,27	0,14	1,43	0,99	1,53	2,57	2,04	0,15	0,22	0,00	0,06	99,96
8	37д	67,00	0,90	17,20	0,81	7,02	0,11	1,21	0,71	1,22	2,64	0,82	0,13	0,00	0,00	0,11	99,77
9	39б	68,02	0,74	15,03	1,89	5,53	0,11	0,92	2,55	1,75	2,72	0,34	0,25	0,05	0,15	0,22	100,00
Среднее ...		64,15	0,98	17,89	1,68	6,97	0,14	1,27	1,86	1,41	2,14	—	0,16	0,14	0,08	0,26	—

Примечание. 1, 2, 6 — полосчатая смесь матового и блестящего стекла; 3 — то же, с желтой пемзой; 4, 5, 7—9 — смеси желтой и серой пемзы и тектитового стекла.

мелкие бомбы и участки в крупных бомбах, где оба стекла дают тонкополосчатое чередование. Первым впечатлением было, что это — смесь основных импактитов (всегда матовых) и тектитов (блестящих). Однако от этого вывода пришлось отказаться, так как по химическому составу смеси с преобладанием того или иного стекла ничем существенным не отличаются друг от друга (табл. 22). Однако в целом данная группа такситов все же несколько богаче кремнеземом, чем основные импактиты, тогда как содержание всех других компонентов, в том числе щелочей, остается на том же уровне. Возможной причиной, пожалуй, может быть лишь добавка в основной импактный расплав кремнистых пород или кварца в каком-то локальном участке очага ударного плавления.

Такситы умеренно кислого состава представлены стеклами и пемзами, широко варьирующими по содержанию SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, но в то же время относительно устойчивыми по содержанию остальных характерных для тектитов компонентов (табл. 23). Они родственны желтым пемзам, но в отличие от последних неоднородны: содержат включения темного стекла, бурой или черной пемзы и т. п.

Такситы кислого состава представляют собой

Кислые тафиты (тектиты-жамаиниты с желтой немзой)

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	Сумма
1	375	69,90	0,85	15,18	1,18	6,07	0,40	1,10	0,71	1,38	2,57	0,82	0,14	0,15	0,07	0,00	99,86
2	31к	70,04	0,99	14,85	0,97	6,90	0,07	1,12	1,14	1,14	2,57	0,28	0,17	0,22	0,13	0,00	100,37
3	31п-3	70,04	0,92	14,16	1,27	6,57	0,12	1,02	1,28	1,31	2,29	0,20	0,17	0,00	0,17	0,17	99,52
4	31р-3	70,20	1,32	17,87	0,34	5,41	0,08	0,20	1,14	0,83	1,33	0,57	0,11	0,25	0,14	0,22	99,54
5	2в	70,85	1,20	16,30	0,31	4,85	0,09	0,94	1,23	1,29	1,77	0,63	0,10	0,12	0,00	0,00	99,68
6	39а-1	71,20	0,99	14,68	1,32	5,20	0,08	0,41	1,56	1,55	2,72	0,25	0,22	0,10	0,05	0,11	100,23
7	30б	71,22	0,99	15,53	0,70	4,87	0,08	0,51	1,98	0,61	2,45	0,56	0,17	0,21	0,32	0,22	99,99
8	39д-2б	71,76	0,80	12,77	1,20	6,24	0,11	1,41	0,85	1,77	2,83	0,14	0,12	0,54	0,01	0,22	99,71
9	2д	71,90	0,74	12,66	0,89	5,08	0,11	2,20	1,08	1,54	2,76	0,55	0,02	0,00	0,00	0,00	99,53
10	37в-1	72,00	0,78	14,17	1,07	5,41	0,09	1,10	0,71	1,38	2,64	0,59	0,10	0,02	0,00	0,11	100,04
11	31в	72,02	0,71	12,49	1,16	4,73	0,09	1,12	1,14	3,00	3,00	1,02	0,16	0,32	0,04	0,00	99,68
12	20д	72,00	0,73	13,50	1,26	4,83	0,05	0,90	0,84	1,85	3,14	0,59	0,15	0,00	0,00	0,00	99,87
13	23б	72,00	0,61	14,41	0,00	6,49	0,12	1,00	0,77	1,80	3,10	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	100,43
14	40б	72,27	0,90	14,35	1,29	4,63	0,09	0,91	0,70	1,58	2,48	0,37	0,11	0,20	0,00	0,27	99,68
15	30е	72,66	0,63	11,30	2,36	4,96	0,09	0,51	1,84	1,64	3,00	0,75	0,19	0,09	0,05	0,55	99,48
16	12в	72,72	0,66	11,31	1,40	6,19	0,14	1,00	0,98	1,75	3,00	0,30	0,15	0,00	0,00	0,00	99,62
17	22в	72,72	0,66	11,98	0,06	5,95	0,16	1,20	0,91	2,00	3,10	0,66	0,18	0,00	0,00	0,00	99,60
18	31д	72,78	0,72	12,67	0,88	5,16	0,07	1,23	1,14	1,71	3,07	0,84	0,16	0,22	0,00	0,00	100,43
19	20в	73,02	0,69	12,15	0,91	4,69	0,10	1,33	1,28	1,79	2,92	0,34	0,17	0,36	0,00	0,00	99,66
20	43в-2	73,06	0,71	12,52	1,01	5,20	0,07	1,02	1,14	1,73	2,75	0,57	0,15	0,00	0,00	0,22	99,93
21	5	73,12	0,82	12,99	0,47	5,80	0,13	0,80	1,08	1,57	2,40	0,63	0,17	0,00	0,00	0,00	99,98
22	45д	73,12	0,76	13,36	2,62	3,14	0,07	0,82	0,99	1,78	2,92	0,34	0,15	0,05	0,00	0,33	100,07
23	2б	73,44	0,75	12,66	0,75	4,62	0,11	1,40	0,95	1,75	2,60	0,80	0,08	0,00	0,00	0,00	99,91
24	40в-1	73,73	0,80	12,66	0,77	5,03	0,09	0,71	0,99	1,73	2,01	0,41	0,11	0,14	0,00	0,27	99,64
25	42д	73,73	0,56	9,09	1,35	5,78	0,10	2,70	0,70	1,80	2,93	0,63	0,14	0,00	0,00	0,00	99,52
26	33р	73,84	0,71	12,48	1,03	4,95	0,10	1,02	0,99	1,53	2,70	0,54	0,13	0,00	0,00	0,06	100,02
27	31б	74,06	0,73	13,00	0,83	4,46	0,09	1,02	0,99	1,50	3,07	0,10	0,18	0,17	0,00	0,00	100,03
Среднее ...		72,73	0,81	13,43	1,02	5,34	0,09	1,05	1,08	1,57	2,69	—	0,14	0,11	0,03	0,10	—

широко распространенные в Жаманшине тектиты-жаманшиниты, содержащие то или иное количество желтой пемзы, за счет которой происходит обеднение стекол кремнеземом и обогащение глиноземом (табл. 24). В эту группу входят самые крупные на Жаманшине бомбы и глыбы кислых стекол, достигающие 0,5 м в поперечнике. Они обычно изобилуют крупными пустотами и другими признаками интенсивного газовыделения. Заслуживают внимания признаки вторичного «заплавления» желтой пемзой ранее сформированных «вихревых каверн» (см. фото 14). Подобные наблюдения важны для понимания способа образования не только рассматриваемых такситов, но и других кислых стекол.

**Микроиргизиты астроблемы Жаманшин.** Из пробы рыхлого материала весом 119 г, взятой П. В. Флоренским в сухом русле в пределах астроблемы, Б. Гласс с соавторами [26] выделил путем просеивания несколько тысяч стеклянных частиц, из которых под биноклем было отобрано и проанализировано 54 стеклянных шарика размером от менее 0,2 до 1 мм и более. В результате этого исследования авторы [26] делают ряд выводов. Прежде всего, они пишут, что микроиргизиты и иргизиты Жаманшина представляют собой давно уже ожидаемое сторонниками импактной концепции «потерянное» связующее звено между импактитами и тектитами. Они предполагают, что кислые жаманшиниты (исходные породы для которых признаются неустановленными) и иргизиты происходили из разных источников или были результатами разных процессов. Высокое содержание никеля в иргизитах связывается с примесью вещества ударника, скорее всего метеорита хондритового состава. Источником иргизитов считаются либо поверхностные лёссы, либо, по П. В. Флоренскому, конденсация вещества взрывного облака. Шариков основного состава обнаружено не было. Вопрос о происхождении основных импактитов и связи их с другими стеклами не обсуждается.

Б. Гласс [26] разделил отобранные шарики на пять групп по чисто внешним признакам: 1) черные непрозрачные с матовой или блестящей поверхностью (9 шт.), 2) прозрачные зеленоватые и желтоватые, блестящие и матовые, без пузырьков (17 шт.), 3) прозрачные матовые и блестящие, но пузырчатые (9 шт.), 4) сильнопузырчатые матовые, с включениями лешательерита и кварца (15 шт.). В 5-ю группу были объединены шарики, которые трудно отнести к одной из четырех групп (4 шт.). Во всех группах содержание  $\text{SiO}_2$  варьирует от 60 до 80% и более, т. е. какого-либо вещественного содержания эти группы не имеют. Поэтому мы предпочли разделить анализы микроиргизитов на группы по химизму, опираясь на аналогию с описанными выше стеклами и учитывая собственный опыт, говорящий о том, что классифицирование стекол только по внешнему облику легко может стать причиной ошибок.

1. Ультракислые шарики (табл. 25) отвечают составу кремнистых пород или кварца или соответствующих им импактитов 1-го рода, уже описанных ранее.

2. Кислые шарики (табл. 26) являются полными аналогами ир-



Ультракислые стеклянные шарики [26]

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ni
1	84,80	0,26	4,63	4,23	1,80	0,28	0,58	0,87	0,07
2	89,70	0,22	4,03	2,09	0,90	0,34	0,55	1,18	0,03
3	94,10	0,12	1,97	1,80	0,75	0,13	0,31	0,67	0,04
4	99,20	0,03	0,00	0,33	0,02	0,01	0,06	0,09	0,04
5	99,90	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00
Среднее	94,18	0,12	2,15	1,75	0,70	0,15	0,30	0,57	0,03

гизитов и с предыдущей группой никак не связаны. Именно их с полным правом можно называть микроиргизитами.

3. Умеренно кислые шарики связаны с микроиргизитами всеми переходами, но от собственно иргизитов отличаются пониженной кремнекислотностью и условно разделены на две подгруппы (табл. 27, 28). Данной группе аналогов среди других стекол Жаманшина нет. Не обнаружено, как уже упоминалось, шариков основного состава, аналогов пемз и, что примечательно, аналогов кислых тектитов-жаманшинитов (если не учитывать единственного анализа 13 в табл. 26). Но все это означает, что, вопреки выводу Б. Гласса и его соавторов, микроиргизиты никак нельзя считать «связующим звеном» между импактитами и тектитами. Это, как и собственно иргизиты, особая группа стекол, которая имеет и особое происхождение. Пожалуй,

Таблица 26

## Кислые микроиргизиты

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ni
1	70,00	0,67	10,50	7,50	4,00	2,10	1,10	2,00	0,20
2	70,20	0,59	11,10	8,51	4,29	0,67	1,15	1,90	0,23
3	70,50	0,62	9,90	7,74	4,12	0,83	2,35	2,77	0,00
4	71,30	0,58	12,80	5,13	2,19	5,54	1,58	1,84	0,00
5	72,10	0,63	9,14	8,95	4,75	1,10	1,00	1,75	0,32
6	72,10	0,58	12,40	5,03	2,11	6,79	1,22	1,62	0,00
7	72,50	0,70	8,50	8,30	5,10	1,00	0,90	1,50	0,25
8	73,60	0,79	9,94	5,09	3,10	2,55	2,04	1,26	0,00
9	73,70	0,75	9,55	6,20	3,33	2,36	1,00	1,90	0,16
10	73,90	0,63	8,05	8,20	5,00	1,05	1,00	1,50	0,21
11	74,20	0,75	9,85	5,35	3,25	2,20	1,25	2,05	0,12
12	74,60	0,72	9,68	6,71	4,43	1,58	1,31	1,02	0,00
13	74,70	0,56	11,90	3,88	1,29	2,84	1,84	2,39	0,00
14	75,10	0,76	9,75	6,18	3,39	2,81	1,03	1,75	0,00
15	76,00	0,45	8,20	5,93	3,00	0,43	1,15	2,60	0,14
16	77,30	0,69	9,40	4,40	2,30	1,95	0,95	1,95	0,09
17	77,40	0,78	9,30	4,45	2,25	1,70	0,95	2,00	0,10
18	79,10	0,69	9,10	4,25	2,30	1,78	0,75	1,85	0,09
Среднее ...	74,26	0,66	10,00	6,25	3,36	2,18	1,26	1,88	0,10

## Умеренно кислые микроиргизиты

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ni
1	59,10	0,61	10,00	12,50	7,80	5,20	1,40	1,50	0,41
2	61,50	0,62	12,60	11,60	6,60	1,90	1,80	2,40	0,30
3	61,80	0,59	12,00	12,30	8,69	2,27	1,58	1,07	0,00
4	62,50	0,62	12,70	10,90	6,38	2,79	1,82	1,59	0,00
5	63,50	0,68	12,60	11,20	6,71	1,96	1,64	1,65	0,00
6	64,90	0,68	12,10	8,70	4,85	3,90	1,02	1,60	0,19
7	65,50	0,73	12,20	8,95	4,81	0,86	1,12	1,89	0,06
8	65,50	0,68	8,18	10,80	7,00	2,08	0,79	1,34	0,33
9	66,80	0,65	8,09	10,30	6,26	1,43	0,97	1,51	0,38
10	67,90	0,71	10,90	6,69	3,76	1,68	1,58	2,63	0,17
11	68,00	0,62	11,50	8,71	4,43	0,74	1,17	1,92	0,24
12	68,10	0,66	12,90	7,56	3,50	1,02	1,16	2,28	0,08
13	68,50	0,59	12,20	5,80	2,25	7,10	1,23	1,70	0,08
14	69,20	0,64	11,00	7,63	4,11	2,38	1,02	2,03	0,18
15	69,50	0,56	11,10	9,41	4,36	0,75	1,02	1,98	0,29
16	69,60	0,65	11,40	8,79	4,33	0,66	1,07	1,89	0,32
17	69,70	0,53	11,80	5,52	2,23	4,20	1,62	2,16	0,00

Среднее ... 67,26 | 0,64 | 11,57 | 9,42 | 5,27 | 2,44 | 1,31 | 1,86 | 0,18

только в гипотезе П. В. Флоренского следует искать рациональное зерно, позволяющее объяснить наблюдаемую картину. Им может оказаться уже упоминавшийся механизм вторичного выплавления иргизитов из тектитов во взрывном облаке, зародившемся путем испарения основных вулканитов фундамента. Возможно, именно поэтому иргизиты обогащены Mg, Fe, Ni и Co, т. е. обычными компонентами основных магматических пород, являющихся на Жаманшине источниками импактитов. При таком подходе нет необходимости обращаться к ударившему телу хондритового состава.

Таблица 28

Умеренно кислые микроиргизиты, богатые Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ni
1	61,50	0,67	15,90	9,95	4,31	2,67	1,90	1,93	0,00
2	62,30	0,60	13,10	9,64	5,23	3,40	2,01	1,74	0,00
3	62,50	0,59	13,00	10,30	5,44	3,01	1,57	1,62	0,00
4	63,10	0,62	13,20	10,30	5,40	3,20	1,55	1,75	0,16
5	64,10	0,81	16,60	7,59	3,41	0,81	1,31	2,79	0,04
6	64,40	0,65	13,50	9,27	4,87	1,99	2,15	2,01	0,00
7	65,00	0,70	16,30	7,20	3,20	3,70	1,52	1,90	0,10
8	65,40	0,75	16,60	7,18	3,44	2,92	1,61	1,81	0,00
9	65,40	0,64	14,60	7,20	3,30	4,50	1,65	2,10	0,18
10	66,40	0,83	14,40	6,93	3,65	1,49	1,41	2,82	0,22
11	67,90	0,81	15,60	8,12	3,96	1,74	2,18	1,98	0,00
12	68,50	0,62	13,10	5,34	2,21	4,50	1,69	1,93	0,00
13	70,00	0,84	15,00	5,65	2,50	0,99	1,89	2,03	0,00
14	71,50	0,83	15,00	5,37	2,57	1,05	1,95	1,91	0,00

Среднее ... 66,19 | 0,71 | 14,84 | 7,93 | 3,85 | 2,59 | 1,75 | 2,04 | 0,05

Изложенный в статье материал основан на макро- и микроскопическом облике стекол и на петрохимических данных, которые в обобщенном виде представлены в табл. 29—31 и на рис. 4, 5. Некоторые выводы имеют предварительный характер.

1. Мишень астроблемы Жаманшин двухслойная: кратерная воронка выработана и в осадочном чехле до глубины около 200 м, и в складчатом фундаменте до глубины 600—800 м. При этом интенсивному ударному метаморфизму, судя по развитию импактитов 1-го рода, подвергались все породы фундамента, относящиеся как к нижней вулканогенно-кремнистой толще  $Pt_2$ — $Pz_1$ , так и к верхней существенно вулканогенной толще  $C_1$ . Признаков ударного метаморфизма пород чехла нет.

2. Очаг выплавления импактных расплавов, судя по составу импактитов 2-го рода, располагался целиком или преимущественно в пределах верхней толщи фундамента, состоящей из пород андезитобазальтового состава.

3. Возможно, происходило плавление существенно глинистых пород осадочного чехла, давших особую группу умеренно кислых стекол — желтых пемз.

4. Кислые жаманшиниты, которые до сих пор было принято считать типичными импактитами, по всем признакам, вплоть до возраста, тождественны австрало-азиатским, в частности вьетнамским, тектитам типа Муон-Нонг. Поэтому логично предположить генетическую (причинную) связь между Жаманшином и гигантским Австрало-Азиатским полем выпадения тектитов. Поскольку Жаманшин источником последнего ни по масштабам, ни по механизму выпадения (рассеяния) стекол быть не может, необходимо искать другие объяснения этой связи.

5. Прямых аналогов тектитов-жаманшинитов среди пород мишени, за исключением маломощного слоя почвы (лёссов), нет. Они, как и тектиты всего мира, чужды своему геологическому окружению, и поэтому вопрос об их происхождении должен решаться с учетом этого обстоятельства, если при дальнейших исследованиях не будет найден другой земной источник вещества тектитов.

6. Происхождение иргизитов, как и тектитов-жаманшинитов, также загадочно. Есть основания предполагать вторичное их выплавление из тектитов при падении последних навстречу взрывным газовым вихрям с обогащением их при этом некоторыми компонентами основных пород фундамента и приобретением таких специфических черт, как окисленность железа и обогащение водой. Вместе с тем считать иргизиты «связующим звеном» между импактитами и тектитам нецелесообразно.

В связи с проблемой происхождения тектитов на примере Жаманшина представляется целесообразным рассмотреть две альтернативные гипотезы: земную, импактную, на сегодня почти общепринятую, и внеземную, кометную [7].

Средний состав основных пород и стекол Жаманина

Породы	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣFeO
1. Измененные ультрабазиты	2	37,87 6,27	0,40 0,08	5,16 6,45	4,78 4,02	6,79 0,20	0,20 0,05	39,27 41,07	5,51 6,95	0,06 0,00	0,43 0,00	0,08 0,01	14,10 3,41
2. Зеленые сланцы, богатые кальцитом	4	47,90 2,27	1,43 0,77	48,78 1,66	5,59 2,20	4,96 2,05	0,29 0,32	5,12 1,29	10,69 2,79	3,74 4,28	1,50 0,97	0,24 0,12	9,99 2,03
3. Зеленые сланцы, бедные кальцитом	5	51,07 3,69	2,14 1,10	17,14 1,05	2,78 1,14	9,77 1,75	0,41 0,03	6,86 4,69	5,47 1,01	3,98 0,79	0,33 0,18	0,31 0,12	12,28 2,20
4. Порфириты и туфы С <sub>1</sub> , богатые кальцитом	5	54,99 3,51	0,86 0,16	19,44 1,51	7,39 1,00	1,49 0,74	0,13 0,03	2,83 0,71	7,99 2,32	3,31 1,77	1,31 0,43	0,20 0,11	8,15 1,25
5. Порфириты и туфы С <sub>1</sub> , бедные кальцитом	2	53,05 0,42	0,89 0,05	21,14 0,65	7,58 0,42	1,49 0,24	0,09 0,02	3,41 0,19	3,90 1,77	6,21 0,24	1,86 0,53	0,31 0,00	8,32 0,13
6. Импациты 4-го рода по вулканитам Pt — P <sub>2</sub>	18	53,50 3,54	1,03 0,32	20,58 2,29	7,55 2,65	2,59 1,46	0,44 0,08	2,81 1,15	6,92 2,42	3,20 1,01	1,40 0,44	0,22 0,11	9,39 2,04
7. Шлаки и пеналы	18	55,30 2,43	0,90 0,13	19,94 0,84	5,34 1,59	3,90 1,61	0,13 0,02	2,50 0,58	7,44 1,14	3,06 0,69	1,50 0,29	0,22 0,06	8,71 0,88
8. Масляные стекла (главным образом бомбы)	27	53,86 1,57	0,90 0,07	19,62 0,74	5,63 1,90	4,15 1,52	0,13 0,03	2,96 0,55	7,35 1,48	3,64 0,59	1,43 0,16	0,26 0,10	9,23 1,02
9. Основные «брызги»	21	54,31 0,97	0,88 0,11	20,21 0,79	Не опр.	7,50 1,04	0,02 0,06	2,70 0,26	8,45 0,77	3,90 0,31	1,41 0,17	0,20 0,05	7,50 1,04
10. Такситы (бомбы)	16	56,53 4,38	0,76 0,01	18,48 1,53	3,54 2,77	5,26 2,87	0,11 0,00	3,03 0,20	7,00 1,53	3,54 0,49	1,45 0,03	0,23 0,00	8,45 1,40

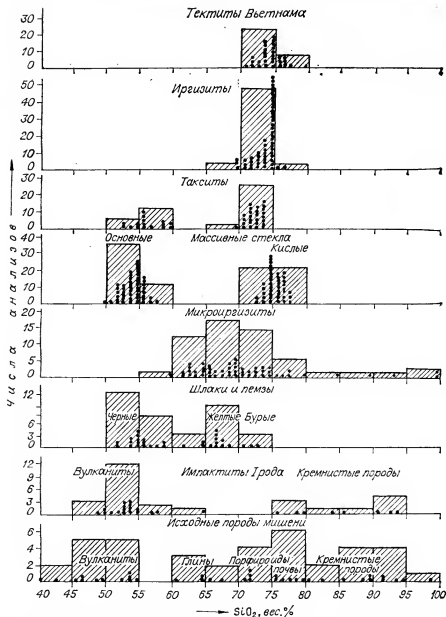


Рис. 4. Гистограммы распределения  $\text{SiO}_2$  в породах и стеклах Жаманшина.

Средний состав умеренно кислых пород и стекол Жаманина

Породы	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣFeO
1. Глины намытого вала	6	$\frac{67,18}{3,25}$	$\frac{0,93}{0,10}$	$\frac{16,29}{2,41}$	$\frac{5,90}{1,94}$	$\frac{0,61}{0,69}$	$\frac{0,06}{0,02}$	$\frac{2,24}{0,32}$	$\frac{2,34}{1,43}$	$\frac{1,67}{0,60}$	$\frac{2,42}{0,33}$	$\frac{0,28}{0,13}$	$\frac{5,93}{1,14}$
2. Желтые пемзы	11	$\frac{67,38}{1,65}$	$\frac{4,02}{0,11}$	$\frac{17,27}{1,85}$	$\frac{0,88}{0,44}$	$\frac{6,53}{1,52}$	$\frac{0,19}{0,22}$	$\frac{4,53}{0,96}$	$\frac{4,27}{0,56}$	$\frac{4,16}{0,34}$	$\frac{2,53}{0,56}$	$\frac{0,16}{0,03}$	$\frac{7,33}{1,24}$
3. Смеси желтой пемзы, тектитов и основных пиктитов	9	$\frac{64,15}{3,33}$	$\frac{0,98}{0,17}$	$\frac{17,89}{3,06}$	$\frac{1,68}{0,64}$	$\frac{6,97}{1,18}$	$\frac{0,14}{0,08}$	$\frac{4,27}{0,27}$	$\frac{4,86}{1,25}$	$\frac{4,41}{0,86}$	$\frac{2,14}{0,59}$	$\frac{0,16}{0,03}$	$\frac{8,50}{0,92}$
4. Микрокристаллы, богатые Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14	$\frac{66,19}{2,80}$	$\frac{0,71}{0,09}$	$\frac{14,84}{1,32}$	Не опр.	$\frac{7,93}{1,81}$	Не опр.	$\frac{3,85}{1,10}$	$\frac{2,59}{1,26}$	$\frac{1,75}{0,26}$	$\frac{2,04}{0,37}$	Не опр.	$\frac{7,93}{1,81}$
5. Микрокристаллы, бедные Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17	$\frac{67,26}{3,76}$	$\frac{0,64}{0,05}$	$\frac{11,57}{1,40}$	*	$\frac{9,42}{2,14}$	*	$\frac{5,27}{1,85}$	$\frac{2,44}{1,79}$	$\frac{1,31}{0,31}$	$\frac{1,86}{0,41}$	*	$\frac{9,42}{2,14}$

Средний состав кислых пород и стекол Жаманина и тектитов Вьетнама

Породы	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣFeO
1. Порфиroidы	3	$\frac{73,18}{2,18}$	$\frac{0,55}{0,67}$	$\frac{15,19}{1,47}$	$\frac{4,11}{0,39}$	$\frac{2,06}{2,17}$	$\frac{0,03}{0,04}$	$\frac{0,61}{0,35}$	$\frac{0,80}{0,36}$	$\frac{3,03}{1,84}$	$\frac{3,34}{1,63}$	$\frac{0,05}{0,08}$	$\frac{3,06}{2,21}$
2. Кремнистые сланцы и кварц	12	$\frac{89,96}{5,55}$	$\frac{0,19}{0,13}$	$\frac{4,03}{2,81}$	$\frac{0,92}{1,08}$	$\frac{1,57}{0,69}$	$\frac{0,03}{0,03}$	$\frac{1,21}{2,09}$	$\frac{0,57}{0,18}$	$\frac{0,70}{1,02}$	$\frac{0,67}{0,56}$	$\frac{0,08}{0,03}$	$\frac{2,40}{1,17}$

3. Импациты 1-го рода по кремнистым сланцам и кварцу	9	$\frac{85,84}{7,37}$	$\frac{0,53}{0,72}$	$\frac{6,55}{4,90}$	$\frac{1,08}{0,69}$	$\frac{1,64}{0,64}$	$\frac{0,03}{0,02}$	$\frac{0,73}{0,45}$	$\frac{2,48}{1,75}$	$\frac{0,51}{0,44}$	$\frac{0,75}{0,62}$	$\frac{0,41}{0,08}$	$\frac{2,62}{0,97}$
4. Микропегматиты (SiO <sub>2</sub> 80%)	5	$\frac{94,48}{5,56}$	$\frac{0,42}{0,41}$	$\frac{2,15}{2,21}$	Не опр.	$\frac{1,75}{1,68}$	$\frac{0,70}{0,76}$	$\frac{0,15}{0,15}$	$\frac{0,30}{0,26}$	$\frac{0,57}{0,50}$	$\frac{0,03}{0,02}$	Не опр.	$\frac{1,75}{1,68}$
5. Почвы (лесс)	4	$\frac{77,14}{1,27}$	$\frac{0,82}{0,02}$	$\frac{41,38}{0,64}$	$\frac{3,00}{1,33}$	$\frac{1,26}{0,65}$	$\frac{0,03}{0,01}$	$\frac{1,13}{0,53}$	$\frac{1,64}{0,75}$	$\frac{1,41}{0,33}$	$\frac{2,32}{0,26}$	$\frac{0,41}{0,03}$	$\frac{3,97}{1,26}$
6. Ржаво-бурые пеллы	3	$\frac{71,40}{1,06}$	$\frac{0,84}{0,09}$	$\frac{42,29}{0,53}$	$\frac{1,37}{0,64}$	$\frac{5,66}{0,53}$	$\frac{0,11}{0,02}$	$\frac{1,81}{0,22}$	$\frac{2,34}{0,45}$	$\frac{1,28}{0,42}$	$\frac{2,71}{0,49}$	$\frac{0,23}{0,05}$	$\frac{6,81}{0,36}$
7. Иргизиты (полные анализы)	15	$\frac{72,50}{2,01}$	$\frac{0,80}{0,41}$	$\frac{40,92}{0,89}$	$\frac{1,60}{0,70}$	$\frac{5,36}{1,52}$	$\frac{0,43}{0,02}$	$\frac{2,92}{1,13}$	$\frac{2,08}{0,86}$	$\frac{1,47}{0,28}$	$\frac{2,04}{0,38}$	$\frac{0,41}{0,06}$	$\frac{6,81}{1,28}$
8. Иргизиты (сокращенные анализы)	37	$\frac{74,84}{0,93}$	$\frac{0,82}{0,06}$	$\frac{40,34}{0,92}$	Не опр.	$\frac{5,64}{0,43}$	Не опр.	$\frac{2,67}{0,77}$	$\frac{2,46}{0,37}$	$\frac{1,46}{0,33}$	$\frac{1,90}{0,43}$	Не опр.	$\frac{5,64}{0,43}$
9. Микропегматиты	18	$\frac{74,26}{2,69}$	$\frac{0,66}{0,09}$	$\frac{40,00}{1,29}$	Не опр.	$\frac{6,25}{1,66}$	Не опр.	$\frac{3,36}{1,14}$	$\frac{2,48}{1,60}$	$\frac{1,26}{0,43}$	$\frac{1,88}{0,44}$	Не опр.	$\frac{6,25}{1,66}$
10. Тектиты-жамашиниты с примесью желтой пеллы	27	$\frac{72,73}{1,24}$	$\frac{0,81}{0,17}$	$\frac{43,43}{1,74}$	$\frac{1,02}{0,57}$	$\frac{5,34}{0,80}$	$\frac{0,09}{0,02}$	$\frac{1,05}{0,49}$	$\frac{1,08}{0,31}$	$\frac{1,57}{0,32}$	$\frac{2,69}{0,43}$	$\frac{0,44}{0,04}$	$\frac{6,26}{0,76}$
11. Тектиты-жамашиниты	42	$\frac{75,73}{1,30}$	$\frac{0,63}{0,07}$	$\frac{41,50}{0,88}$	$\frac{0,63}{0,48}$	$\frac{4,74}{0,96}$	$\frac{0,10}{0,02}$	$\frac{0,87}{0,47}$	$\frac{0,94}{0,21}$	$\frac{1,83}{0,42}$	$\frac{2,86}{0,19}$	$\frac{0,12}{0,05}$	$\frac{5,30}{1,06}$
12. Тектиты типа Муонг-Нонг (Вьетнам)	14	$\frac{75,12}{1,93}$	$\frac{0,71}{0,06}$	$\frac{41,24}{0,97}$	$\frac{0,33}{0,23}$	$\frac{4,30}{0,55}$	$\frac{0,09}{0,01}$	$\frac{1,73}{0,38}$	$\frac{1,50}{0,38}$	$\frac{1,43}{0,42}$	$\frac{2,39}{0,15}$	$\frac{0,09}{0,01}$	$\frac{4,60}{0,44}$
13. Тектиты — слоистые сферы (Вьетнам)	4	$\frac{73,99}{0,70}$	$\frac{0,78}{0,03}$	$\frac{42,57}{0,17}$	$\frac{0,00}{0,00}$	$\frac{4,77}{0,31}$	$\frac{0,08}{0,00}$	$\frac{1,79}{0,06}$	$\frac{2,04}{0,32}$	$\frac{1,42}{0,21}$	$\frac{2,40}{0,18}$	$\frac{0,08}{0,02}$	$\frac{4,77}{0,31}$
14. Тектиты-индоиниты (Вьетнам)	13	$\frac{73,24}{1,54}$	$\frac{0,78}{0,02}$	$\frac{42,48}{0,33}$	$\frac{0,15}{0,29}$	$\frac{4,81}{0,57}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{1,94}{0,25}$	$\frac{2,02}{0,34}$	$\frac{1,44}{0,28}$	$\frac{2,39}{0,18}$	$\frac{0,07}{0,02}$	$\frac{4,96}{0,59}$

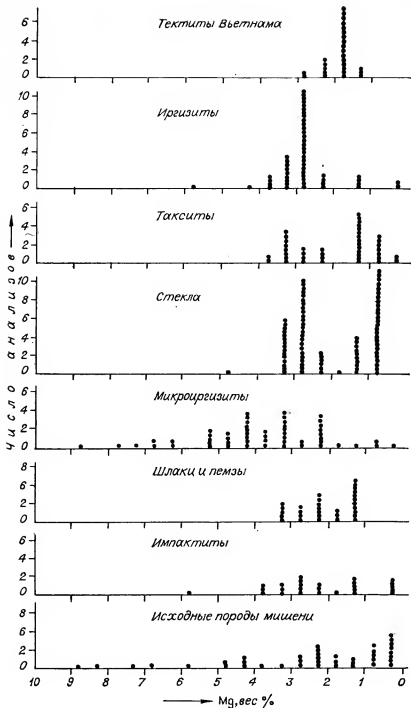


Рис. 5. Гистограммы распределения  $MgO$  в породах и стеклах Жаманшинца.



Для подтверждения импактной концепции прежде всего необходимо решить вопрос об исходном веществе тектитов. Следует продолжить поиски его в породах фундамента, в первую очередь среди редких и плохо еще изученных порфириидов и кремнисто-глинистых пород. Доказательством такого рода источника тектитов было бы обнаружение донных залежей тектитового состава при помощи глубокого (до 1 км) бурения. Кроме того, нуждается в доказательствах широко распространенное, но до сих пор умозрительное представление о возможности образования тектитов путем поверхностного и сугубо избирательного расплавления почвы (лёссов) при метеоритных ударах. В конечном счете перед импактной концепцией стоит задача разработать такую модель импактного события, которая объясняла бы все наблюдаемые на Жаманшине соотношения между мишенью и самыми различными стеклами. Думается, что она будет принципиально отличаться от тех моделей, которые предлагали на примере других, гораздо более простых, астроблем. В этом плане Жаманшин — уникальный научный полигон.

Альтернативная гипотеза доставки тектитов в ледяной глыбе-комете [7] может быть подтверждена рядом конкретных фактов: наличием возрастного парадокса, т. е. существенной разницы между возрастом не переплавленных при ударе тектитов и возрастом самой астроблемы и импактитов; обнаружением тектитов в кратерах-сателлитах; подтверждением вторичного выплавления иргизитов из тектитов, которое может быть связано с их выпадением навстречу взрыву из тыловых (запаздывающих) фрагментов кометного тела, и т. п.

Кометная гипотеза предусматривает единственную в своем роде возможность понять природу связи Жаманшина с Австрало-Азиатским тектитовым полем, о которой уже неоднократно писали ранее [25, 31, 32 и др.]. Эта связь может быть объяснена происхождением тектитов обоих объектов из одного кометного тела, разделившегося на две части при подходе к Земле. При этом меньшая часть, имевшая крутую траекторию входа в атмосферу (и, в свою очередь, состоявшая из роя фрагментов), создала астроблему Жаманшин, а другая, несравненно большая, прошла вдоль атмосферы по касательной и породила тектитовый «ливень» на огромном пространстве от Южного Китая до Австралии. Основанием для этой идеи, помимо уже установленного сходства тектитов, служит расположение Жаманшина вдоль той же дуги большого круга, по которой вытянуто Австрало-Азиатское поле, т. е. на одной траектории. Подтверждением высказанной мысли было бы обнаружение вдоль этой же дуги других астроблем типа жаманшинской или новых ареалов выпадения тектитов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко Я. И. Строение мелких метеоритных кратеров Жаманшина (Казахстан). — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1983, № 10, с. 122—126.
2. Бойко Я. И., Сажнов В. В. Побочные метеоритные кратеры Жаманшина (Казахстан). — Докл. АН СССР, 1981, т. 258, № 2, с. 438—441.
3. Вахрамеев В. А., Яншин А. Л. Палеозой в Северном Приаралье. — Докл. АН СССР. Нов. серия, 1940, т. XXX, с. 818—821.

4. Вишневский С. А., Пальчик Н. А. Козсит в брекчиях структуры Жаманшин.— Докл. АН СССР, 1978, т. 243, № 5, с. 1269—1272.
5. Геология астроблем.— Л.: Недра, 1980.— 231 с.
6. Изох Э. П. Парадокс возраста тектитов и полей их выпадения.— Метеоритика, 1985, вып. 44, с. 127—134.
7. Изох Э. П., Ле Дык Ан. Тектиты Вьетнама. Гипотеза кометной транспортировки.— Метеоритика, 1983, вып. 42, с. 158—169.
8. Изох Э. П., Масайтис В. Л., Бойко Я. П. Стекла астроблемы Жаманшин.— В кн.: Тезисы докладов XIX Всесоюзной конференции по метеоритике и космохимии. М.: изд. GEOXH, 1984, с. 104—105.
9. Импаكتиты/Фельдман В. И., Сазонов Л. В., Коротаева Н. Н. и др.— М.: Изд-во МГУ, 1981.— 204 с.
10. Кирюхин Л. Г., Флоренский П. В., Соболев Ю. С. Загадка Жаманшина.— Природа, 1969, № 3, с. 70—72.
11. Колесов Г. М., Эрнандес А., Еркушев Ю. А., Изох Э. П. Сравнительная характеристика элементного состава кислых стекол метеоритного кратера Жаманшин и австрало-азиатских тектитов.— В кн.: Тезисы докладов XIX Всесоюзной конференции по метеоритике и космохимии. М.: изд. GEOXH, 1984, с. 129—130.
12. Костик Г. А., Пилия Б. В. Неогеновые вулканические стекла урочища Жаманшин в Прииргизье.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1973, № 2, с. 145—148.
13. Кузнецов Н. И., Плеханова К. Р., Лапишева А. А. О кайнозойских вулканических породах юго-западной части Тургайского прогиба.— Сов. геология, 1974, № 2, с. 142—146.
14. Масайтис В. Л., Бойко Я. П., Изох Э. П. Астроблема Жаманшин: параметры и особенности внутреннего строения.— В кн.: Тезисы докладов XIX Всесоюзной конференции по метеоритике и космохимии. М.: изд. GEOXH, 1984, с. 102—104.
15. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попыгайский метеоритный кратер.— М.: Наука, 1975.— 124 с.
16. Структуры и текстуры взрывных брекчий и импаكتитов/Под ред. В. Л. Масайтиса.— Л.: Недра, 1983.— 160 с.
17. Флоренский П. В. Метеоритный кратер Жаманшин (Северное Припяралье) и его тектиты и импаكتиты.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1975, № 10, с. 73—86.
18. Флоренский П. В., Бочко Р. А., Кузьмин В. А. Морфология тектитов-иргизитов.— Астроном. вестник, 1980, т. 14, № 4, с. 234—240.
19. Флоренский П. В., Дабига А. И. Метеоритный кратер Жаманшин.— М.: Наука, 1980.— 127 с.
20. Флоренский П. В., Перельгин В. П., Баженев М. Л. и др. Комплексное определение возраста метеоритного кратера Жаманшин.— Астроном. вестник, 1979, т. 13, № 3, с. 178—186.
21. Яншин А. Л. Геология Северного Припяралья.— М.: изд. МОИП, 1953.— 736 с.
22. Barnes V. E. Description and origin of large tektite from Thailand.— Chem. Erde, 1971, v. 30, N 1-4, p. 13—19.
23. Ehmann W. D., Stroube W. B., Ali M. Z., Hossain T. I. M. Zhamanshin crater glasses: chemical composition and comparison with tektites.— Meteoritics, 1977, v. 12, N 3, p. 212—215.
24. Fredriksson K., De Gasparis A., Ehman W. The Zhamanshin structure: chemical and physical properties of selected samples.— Meteoritics, 1977, v. 12, N 3, p. 229—231.
25. Glass B. P. Zhamanshin crater: possible source of the australasian tektites.— Geology, 1979, v. 7, p. 351—353.
26. Glass B. P., Fredriksson K., Florensky P. W. Microirghizites recovered from a sediment sample from the Zhamanshin impact structure.— J. Geophys. Res., 1983, v. 388, Suppl., p. B319—B330.
27. Heide K., Völsch G., Florenski P. W. Comparing investigations on the surface structures of irghizites and pyroclastics by SEM.— Meteoritics, 1982, v. 17, N 1, p. 1—7.

28. Lacroix A. Les tektites sans formes figurées de l'Indochine.— C. r. Acad. Sci. Paris, 1935, v. 200, p. 2129—2132.
29. Schwarcz H. P. A possible origin of tektites by soil fusion at impact sites.— Nature, 1962, v. 194, N 4823, p. 8—10.
30. Shaw H. F., Wasserburg G. J. Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm — Nd and Rb — Sr systematics.— Earth and Planet. Sci. Lett., 1982, v. 60, N 2, p. 155—177.
31. Taylor S. R., McLennan S. M. Chemical relationships among irghizites, zhamanshinites, australasian tektites and Henbury impact glasses.— Geochim. et Cosmochim. Acta, 1979, v. 43, N 9, p. 1551—1565.
32. Van Patter D. M., Swann C. P., Glass B. P. Proton probe analysis of an irghizite and high-magnesium Java tektite.— Geochim. et Cosmochim. Acta, 1981, v. 45, N 2, p. 229—234.

А. П. БОЯРКИНА, Н. В. ВАСИЛЬЕВ, Г. Г. ГЛУХОВ,  
Ю. А. ЛЬВОВ, В. И. РЕЗЧИКОВ, С. И. ШЕЛУДЬКО

### К ОЦЕНКЕ КОСМОГЕННОГО ПРИТОКА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

В последние годы в связи с дальнейшим развитием учения В. И. Вернадского о материальном обмене в системе «Космос — Земля» [6] интерес к космической пыли и ее ингредиентам существенно возрос. Хотя литература по этому вопросу обширна [7, 8, 13, 14 и др.], основная ее часть посвящена суммарным оценкам притока космического вещества, материалов же по оценкам его отдельных ингредиентов, включая тяжелые металлы, почти нет. Это связано как с методическими сложностями, так и с особенностями глобального распространения техногенного аэрозоля [9, 10], разделение которого с природным, в том числе космогенным, представляет немалые трудности.

Один из путей решений этой задачи — выделение аэрозоля, выпавшего на поверхность Земли в доиндустриальный период в местах, удаленных от населенных пунктов. Как было показано ранее [1—5, 11], для этого удобно использовать торфяные отложения сфагновых мхов, в частности сфагна буроого. Изучение сферических частиц размером 7—100 мкм и более, выделенных из различных слоев торфа междуречий Подкаменная — Нижняя Тунгуска (Красноярский край) и Чулым — Кеть (Томская область), показало, что их годовой приток на 1 дм<sup>2</sup> составляет примерно единицу и за последние 250—300 лет существенно не изменялся [1, 3, 5]. Вблизи индустриальных центров, напротив, интенсивность притока сферул указанного размера за последние ~100 лет экспоненциально нарастает [1, 2].

Цель данной работы состояла в том, чтобы, используя ядерно-физические методы анализа, оценить выпадение на поверхность Земли некоторых тяжелых металлов с природным аэрозолем и тем самым определить верхнюю границу их притока космогенного происхождения. Районы работ выбирали таким образом, чтобы свести к мини-

муму терригенный вклад в природный аэрозоль (таежная зона со сплошным покрытием подстилающей поверхности травяным покровом).

Методика отбора и подготовки проб для анализов такова [11]. На верховом болоте выбирали участок дернины сфагна бурого и вырезали колонку торфа глубиной 45—50 см с квадратным сечением 1 дм<sup>2</sup>. Затем ее рассекали на горизонтальные пласти. Верхний пласт (очес, живая часть волокна) отбирали толщиной 18 см, остальные слои — по 3 см. Возраст пластов и число лет формирования торфа в слое определены специальными исследованиями в работах [3, 12].

Район работ для исследования природного аэрозоля — междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок. Пробы отбирали в местах, удаленных от ближайших промышленных центров (Красноярска, Иркутска, Норильска) по крайней мере на 700 км, а от мелких населенных пунктов — на 80 км. Для сравнения в работе обсуждаются результаты, полученные на основании изучения колонок торфа, отобранных вблизи промышленного центра и, следовательно, испытывающих техногенное воздействие. Поскольку олиготрофные сфагновые мхи и отложенные ими торфы получают минеральное питание из атмосферы, то количество зольных веществ на единицу веса и объема торфяного образца можно также рассматривать как параметр осевшего в исследуемом слое аэрозоля.

Вблизи промышленного центра общее количество аэрозоля, выпадавшего на подстилающую поверхность в начале текущего столетия, оценивается  $(0,040 \pm 0,010)$  г/дм<sup>2</sup>·год. В последующие годы его приток постепенно нарастал и к настоящему времени увеличился более чем в 4 раза, т. е. достиг  $(0,184 \pm 0,036)$  г/дм<sup>2</sup>·год. В районе междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок за период 1800—1978 гг. выпадение аэрозоля сравнительно равномерно и в среднем составляет  $(0,030 \pm 0,004)$  г/дм<sup>2</sup>·год.

Определения тяжелых металлов в торфяных образцах проводились на базе реактора НИИ ядерной физики Томского политехнического института. Образцы торфа, упакованные в фольгу и помещенные в специальные контейнеры, облучали в вертикальном канале реактора ИРТ-2000 при плотности потока  $5 \cdot 10^{12}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с) в течение 24 ч. Измерения спектра наведенной  $\gamma$ -активности проводили с помощью германий-литиевого детектора объемом 60 см<sup>3</sup> и анализатора NTA-512В спустя 4, 14 и 60 дней после конца облучения. Обработку спектров осуществляли на ЭВМ «Напри-К», связанной с анализатором. В результате были определены железо, кобальт, скандий и золото.

Результаты определений этих элементов в пересчете на годовой приток на единицу подстилающей поверхности представлены в табл. 1 (для междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок), 2 (для промышленного центра).

Из анализа табл. 1 следует, что за последние 250—300 лет существенных изменений в интенсивности притока тяжелых металлов на подстилающую поверхность не произошло, т. е. современные их выпадения не отличаются от выпадений доиндустриального периода,

Таблица 1

Приток тяжелых металлов на подстилающую поверхность между-  
речья Подкаменной и Нижней Тунгусок,  $\text{мкг/дм}^2\cdot\text{год}$

Годы	Железо	Кобальт	Скандий	Золото
1957—1972	30	0,03	0,06	0,017
1943—1957	50	0,01	0,04	0,005
1927—1943	30	0,04	0,02	0,008
1910—1927	110	0,01	0,12	0,013
1891—1910	30	0,04	0,05	0,014
1867—1891	20	0,01	0,02	0,019
1835—1867	20	0,03	0,01	0,013
1801—1835	30	0,01	0,02	0,004
1765—1801	60	0,06	0,08	0,017
Среднее ...	$40 \pm 10$	$0,03 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$	$0,012 \pm 0,002$

а значит, основная масса аэрозоля имеет природное происхождение. Таким образом, на  $1 \text{ дм}^2$  подстилающей поверхности района между-речья Подкаменной и Нижней Тунгусок ежегодно поступает ( $40 \pm 10$ )  $\text{мкг}$  железа, ( $0,03 \pm 0,01$ )  $\text{мкг}$  кобальта, ( $0,05 \pm 0,01$ )  $\text{мкг}$  скандия и ( $0,012 \pm 0,002$ )  $\text{мкг}$  золота.

Анализ табл. 2 показал, что за текущее столетие выпадение железа возросло в 12—26 раз, кобальта и скандия ~в 7 раз, золота в 5 раз, что естественно объяснить близостью промышленного центра, и, следовательно, значительная часть аэрозоля в данном случае имеет техногенное происхождение.

Если принять полученные оценки природных выпадений аэрозоля и входящих в его состав тяжелых металлов за верхнюю границу поступления космогенного материала на поверхность Земли, то можно сказать, что скорость аккреции поверхностью Земли минеральной составляющей пыли  $1,5 \cdot 10^9 \text{ т/год}$ . Эта величина совпадает с верхней границей оценок выпадения космического вещества на Землю ( $10^2$ — $10^9 \text{ т/год}$ ) [13]. Аналогично верхняя граница скорости аккреции Землей железа составляет  $2 \cdot 10^6 \text{ т/год}$ , кобальта — 150, скандия — 250, золота — 60  $\text{т/год}$ .

Данные результаты представляют интерес не только с точки зрения оценки притока космогенного материала на поверхность Земли,

Таблица 2

Приток тяжелых металлов на подстилающую поверхность вблизи промышленного центра,  $\text{мкг/дм}^2\cdot\text{год}$

Годы	Железо	Кобальт	Скандий	Золото	Годы	Железо	Кобальт	Скандий	Золото
1956—1978	4400	1,02	0,94	0,057	1927—1933	250	0,22	0,25	0,022
1951—1956	2640	0,71	0,71	0,041	1920—1927	380	0,26	0,27	0,018
1945—1951	720	0,55	0,67	0,010	1912—1920	170	0,14	0,22	0,024
1940—1945	830	0,41	0,48	0,030	1903—1912	360	0,16	0,13	0,011
1933—1940	420	0,32	0,44	0,015					

но и как фоновые при изучении массы распыленного вещества при взрывах крупных метеоритов. В частности, они могут служить нулевыми показателями при оценках вещества Тунгусского метеорита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бояркина А. П. Исследование соотношения космических и техногенных аэрозольных сферул в торфах.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 216—222.
2. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Ваулин П. П. и др. К оценке выпадения космической и индустриальной пыли на больших площадях.— В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 4. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 45—53.
3. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Назаренко М. К. Количественный анализ сферических микрочастиц по материалам сбора их в сфагновых торфах.— Метеоритика, 1976, вып. 35, с. 69—72.
4. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Резчиков В. И., Тюлюпо Е. Б. Нейтронно-активационный анализ торфа как свидетеля техногенного загрязнения атмосферы.— В кн.: Труды НИИ ядерной физики. Вып. 7. М.: Атомиздат, 1977, с. 76—82.
5. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Назаренко М. К. и др. Динамика притока сферической фракции метеорной пыли на поверхности Земли.— Астроном. вестник, 1975, т. 9, № 3, с. 178—183.
6. Вернадский В. И. Об изучении космической пыли.— Мирозведение, 1932, т. 21, № 5, с. 33—41.
7. Виленский В. Д. Сферические микрочастицы в ледниковом покрове Антарктиды.— Метеоритика, 1972, вып. 31, с. 57—61.
8. Выпадение космического вещества на поверхность Земли/Иванова Г. М., Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1975.— 120 с.
9. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды.— Л.: Гидрометеонадат, 1979.— 375 с.
10. Кист А. А. Современное состояние и перспективы применения ядерно-физических методов анализа в контроле окружающей среды.— В кн.: Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды. Л.: Гидрометеонадат, 1980, с. 5—20.
11. Львов Ю. А. Методика отбора и обработки торфа для выделения мелко-дисперсной минеральной фракции.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 90—93.
12. Мульдияров Е. Я., Лапшина Е. Д. Датировка верхних слоев торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей.— В кн.: Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983, с. 75—84.
13. Симоненко А. Н., Левин Б. Ю. Приток космического вещества на Землю.— Метеоритика, 1972, вып. 31, с. 45—56.
14. Фесенков В. Г. Достижения и актуальные проблемы метеоритики.— Метеоритика, 1972, вып. 31, с. 3—17.

# РОЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

Существование в Солнечной системе метеоров с гиперболическими орбитами, т. е. со скоростями выше 73 км/с [4], ставит вопрос о механизме их торможения, включающем, возможно, неизученные физические процессы. Квадратичная зависимость кинетической энергии от скорости, приводящая к резкому росту величины диссипирующей энергии, может явиться причиной появления качественно новых эффектов.

Среди них наиболее очевидный — усиление многократной ионизации атомов. Линии двукратно ионизированных элементов ( $\text{Si}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) в спектрах быстрых метеоров фотографировали неоднократно [1]. Ионизационный потенциал атомов легких элементов относительно невелик (для Н — 13,59 эВ, для N первый потенциал ионизации 14,54 эВ, второй — 29,61 эВ, до третьей оболочки — 277,89 эВ, вся энергия связи 148,65 эВ, для Si — 8,15 эВ, 16,34 эВ и т. д.).

Скорость быстрого метеорного тела относительно атомов атмосферы такова, что кинетическая энергия атомов тела может превысить потенциал ионизации. Например, для атома  $\text{Fe}^{26}$  при 70 км/с

$$T_{\text{Fe}} = \frac{mv^2}{2} = 2,3 \cdot 10^{-16} \text{ Дж} = 1437 \text{ эВ},$$

для  $\text{N}^{14}$   $T_{\text{N}} = 328 \text{ эВ}$  и т. д.

При торможении метеорной частицы в атмосфере всегда происходит ионизация как атомов воздуха, так и атомов метеорного тела. Эксперименты с искусственными метеоритами микронных размеров показали [12], что при торможении железных частиц, скорость которых приближалась к 45 км/с, вероятность ионизации атомов частицы возрастала до единицы. При торможении быстрой метеорной частицы  $10^{-5}$  ее полной энергии расходуется на ионизацию,  $10^{-3}$  — на электромагнитное излучение в радиодиапазоне,  $10^{-2}$  — на излучение видимого света [1]. Основная же часть энергии диссипирует, переходя непосредственно в тепло. Однако можно предвидеть случаи, когда при торможении метеоритных тел схема энергетической конверсии окажется более сложной.

Переход большей части кинетической, электрической, звуковой и других видов упорядоченной энергии в тепло представляется естественным следствием второго начала термодинамики. Однако в любой системе скорость роста энтропии не может быть бесконечной. Если реализуются условия, при которых скорость поступления свободной энергии в открытую систему больше скорости роста энтропии, то могут возникнуть «необычные» физические явления. В действительности явления этого класса столь же естественны, как и дисси-

падия, но в рамках обыденного опыта нередко представляются маловероятными (рост и стабилизация флуктуаций, возникновение сложных структур и т. д.). Физическая теория систем, далеких от равновесия, способных реализовать маловероятные состояния, успешно развивается [5, 10].

Представляет интерес вопрос о возникновении подобных ситуаций в метеоритике. Неравновесная термодинамика утверждает, что необходимым условием возникновения эфемерных самоорганизующихся образований — диссипативных структур — является избыток свободной энергии в условиях, когда скорость роста энтропии замедлена. Кинетическая энергия метеора в условиях, когда конвертирование ее в теплоту затруднено, очевидно, может расходоваться либо на разрыв химических связей, либо на образование диссипативных структур, либо на то и другое вместе. Малая плотность воздуха на больших высотах ограничивает тепловую конверсию. Другое следствие разреженности воздуха на больших высотах — это увеличение вероятности флуктуаций плотности. После торможения в области флуктуационного повышения плотности метеорное вещество оказывается снова в разреженной среде, ограничивающей возможности теплового рассеяния энергии. Потерянная кинетическая энергия переходит в энергию возбуждения и ионизации атомов воздуха и метеороида. Ослабление связи возбужденных электронов с ядром и различная инерция электронов и ядер, массы которых различаются на три-четыре порядка, могут стать причиной разделения зарядов при торможении, особенно если метеорное тело уже несло электрический заряд.

Случайный захват электронов на уровне многократно ионизованных атомов, а также свободно-свободные переходы электронов в разрушающемся теле будут сопровождаться ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, которое частично вновь поглотится образовавшимся сгустком ионизированного вещества — микроплазмой. Поглощенное излучение вновь вызывает электронные переходы. Микроплазма, очевидно, просуществует небольшое, но конечное время до тех пор, пока плотность излучения  $w_1$  в его пределах будет превышать плотность энергии вещества  $w_2$ :

$$W = w_1 + w_2 = \frac{\sigma}{\rho} \cdot T^4 + c_v T. \quad (1)$$

Первый член суммы приближенно выражен через плотность равновесного теплового излучения плазмы с плотностью  $\rho$  и температурой  $T$ ,  $\sigma$  — константа Стефана—Больцмана,  $c_v$  — теплоемкость вещества плазмы.

Неравенство

$$w_1 > w_2 \quad (2)$$

требует низких значений  $\rho$  и высоких  $T$ . Нетрудно убедиться, что в рассматриваемых условиях неравенство (2) может быть выполнено.

Микроплазма представляет собой аккумулятор свободной энергии. Возможности такого аккумулятора могут быть проиллюстрированы наглядными примерами. Поскольку 1 г  $Al^{13}$  содержит



$5,87 \cdot 10^{23}$  элементарных зарядов, в нем сбалансировано  $1,6 \cdot 10^{-19} \times \times 5,87 \cdot 10^{23} = 9,2 \cdot 10^4$  Кл (в грозовом разряде реализуется 10–30 Кл электростатического электричества). Электростатическая энергия 1 кг азота составляет  $3 \cdot 10^{28}$  эВ, т. е. только в 17 раз меньше, чем может выделяться при расщеплении 1 кг урана. Энергия электронных оболочек атома при взрыве атомной бомбы, как известно, активно участвует в конверсии ядерной энергии, обеспечивая выход светового и рентгеновского излучения, составляющий не менее 30% общей энергии [6].

Мы обращаем внимание на тот факт, что кинетическая энергия  $T$  метеорных тел соответствует диапазону энергии, запасенной в электронных оболочках атомов, что может быть проиллюстрировано следующей таблицей.

Кинетическая энергия  $T$  (эВ) атома, движущегося со скоростью  $v$

Атом элемента	$v$ , км/с				
	1	10	70	100	300
H	$5 \cdot 10^{-3}$	0,52	25	52	470
Si	0,15	14,6	716	1 430	13 125
U	1,2	120	5950	12 380	111 625

Для достаточно тяжелых атомов энергия полной ионизации может быть приближенно рассчитана по формуле:  $e = 15z^{7/3}$ . Для типичных атомов метеоритного вещества энергии полной ионизации оказываются: для С — 1 кэВ, для Si — около 7 кэВ, для Fe — 30 кэВ. Приравнивая энергии  $T$  и  $e$ , получим выражение для критической скорости метеорного тела (в системе СИ):

$$v_{кр} = 2,19 \cdot 10^{-9} z^{1,17} \cdot m^{-0,5}, \text{ м/с.}$$

Критическая скорость оказывается для С — 125 км/с, для Si — 234 км/с, для Fe — 335 км/с. Для  $Hv_{кр} = 52$  км/с, что может иметь значение при рассмотрении взаимодействия солнечных протонов с кометами. Таким образом, кинетическая энергия гиперболических метеорных тел достаточна для разбаланса не только валентных, но и более глубоких электронных оболочек атомов. Насколько нам известно, специальные эксперименты по изучению этого эффекта пока не проводились. Однако обсуждалась сходная проблема инициирования термоядерных реакций на дейтериевых микроишнях путем конверсии кинетической энергии твердых частиц микронных размеров в тепловую энергию [11].

Можно рассмотреть природный или искусственный конвертор энергии, освобождающий только энергию электронных оболочек и не затрагивающий энергию ядра. Любая общая модель такого конвертора будет включать «катализатор», снижающий кулоновские барьеры в атоме, и разделитель зарядов, способствующий вылету электронов. В нулевом приближении расчет конвертора может быть проведен на базе статистической теории атома, при этом можно вос-

пользоваться решением квантово-механической задачи о трехмерном потенциальном барьере, рассмотренной, например, в [2].

В интересующем нас случае потенциальный барьер  $U_m$  образован кулоновскими полями ядра и выбранной электронной оболочки с боровским радиусом  $r_0$  и может быть изображен в виде сферы диаметром  $2r_0$ . Скорость электронов оболочки —  $u$ , время жизни электрона в возбужденном состоянии —  $\tau$ . Известно, что сильное электрическое поле  $E$  способно разбалансировать атом, т. е. вызывать уход электронов сквозь потенциальный барьер  $U_m$  вследствие увеличения в поле его прозрачности  $D$  (туннельный эффект). Условие разбаланса атома в рамках используемого приближения [2]

$$\tau \geq \frac{Du}{2r_0}. \quad (3)$$

Для коллектива атомов вместо  $\tau$  в левой части неравенства будет, очевидно, некоторое эффективное время жизни  $\tau_{\text{эф}}$ . Для микроплазмы, состоящего из большого числа атомов, эффективное время жизни электронов в возбужденном состоянии может быть повышено путем подвода внешней энергии (накачки). При торможении метеорного тела условия, обеспечивающие выполнение неравенства (3) сразу для многих атомов, возникают скачкообразно. В таком случае происходит необратимое разделение зарядов за время порядка  $t \sim \frac{h}{2\pi U_m}$ , где  $h$  — постоянная Планка. Для наружных оболочек H, N, Si  $t$  порядка  $10^{-13}$  с, для более глубоких — еще меньше. Следовательно, процесс выделения энергии электронов атомных оболочек будет носить характер взрыва.

Вероятно, могут существовать и другие способы электродинамического разбаланса вещества. Возможность и последствия разбаланса должны учитываться в космогонических моделях. Например, если относительная скорость частиц газопылевого облака превышает 300 км/с, то, по-видимому, невозможно образование никакого вещества — столкновения атомов приводят к их разрушению, и вещество будет представлять собой высокоэнергетическую плазму, даже если хаотическая компонента векторов скорости атомов близка к нулю.

Гипотеза о возможности взрывного выделения электронной энергии атомов может дать ключ к объяснению некоторых аномальных эффектов Тунгусского метеорита [3]. В настоящее время высказаны самые различные гипотезы об источнике энергии, выделившейся при высотном взрыве Тунгусского космического тела. Рассматривались тепловой, абляционный, фазово-абляционный, реологический, электродинамический, ядерный взрывы. Сравнительный анализ этих моделей, несомненно, представляет интерес, однако такая задача выходит за рамки данной статьи. Мы хотим лишь отметить, что рассмотренные источники энерговыделения не способны объяснить причины высокой концентрации энергии Тунгусского взрыва. По последней оценке [8], энергия его соответствовала тротиловому эквиваленту 40 Мт. В упомянутых моделях подразумевается, что эта энергия конвертирована в ударную волну либо из кинетической, либо из внут-

ренной энергии. При этом допускается, что подбор достаточно большой массы может обеспечить выделение энергии порядка десятков мегатонн даже для скорости порядка 20 км/с или для слабого энерговыделения абляционного или реологического взрыва. Ошибка подобных расчетов — в игнорировании одной из аксиом теории взрывчатых веществ, которая утверждает, что интенсивность разрушений и выход световой энергии зависят не от общей энергии взрыва, а от ее объемной плотности (концентрации). Химический взрыв не может моделировать ударную волну мегатонного точечного взрыва без нарушения закона подобия.

Если бы энергия Тунгусского взрыва имела объемную плотность энергии тротилового заряда, то оценка энергии взрыва по барограммам и сейсмограммам не совпала бы с оценкой тротилового эквивалента по интенсивности разрушений на местности, для которой использовали масштаб избыточного давления ядерного взрыва. Следовательно, концентрация энергии Тунгусского взрыва была существенно выше концентрации энергии при химическом или абляционном взрыве с тем же тротильным эквивалентом, на что впервые указал А. В. Золотов [7]. Заключение о высокой концентрации энергии взрыва Тунгусского метеорита подтвердил И. П. Пасечник [8].

Известно, что проблема концентрации энергии существует и для ядерного взрыва: он становится возможным лишь в специальных условиях, обеспечивающих нужную концентрацию энергии [6]. Для химических взрывчатых веществ такая концентрация недостижима. Концентрация электронной энергии в атоме значительно выше концентрации химической или структурной энергии вещества, хотя и уступает объемной плотности свободной энергии ядра.

Возможность хотя бы кратковременной аккумуляции больших количеств электрической энергии на поверхности большого метеорита при его торможении была использована В. Ф. Соляником в его модели электродинамического взрыва [9]. На наш взгляд, эта модель плохо согласуется с реальной картиной наземных следов и разрушений, оставленных Тунгусской катастрофой.

Однако представление об аккумуляции сверхмощного электрического заряда может быть использовано в более сложной модели Тунгусского болида. Мы ограничимся качественным описанием простейшего варианта такой модели. Рассматривается быстрое торможение большого диэлектрического тела, имеющего вакуумно-плотные полости с низким давлением газа. Газ при аэродинамическом нагреве выгорает или реагирует со стенками полости, образуя твердую фазу. Электростатический заряд, образовавшийся, например, по схеме В. Ф. Соляника на внешней поверхности тела, создает внутри него напряженность порядка  $10^8$  В/см в виде флуктуирующего импульсного поля. Аэродинамическое обтекание и связанный с ним нагрев вызывают абляционный поток вещества не только с внешней, но и с внутренней поверхности тела. В полостях на короткое время могут возникнуть условия «абсолютно черного тела» для излучения, приближенно описываемого уравнением (1) при выполнении неравенства (2). Таким образом, предполагается, что механизм образования вы-

сокоэнергетического плазменного сгущения, рассмотренный выше для условий торможения метеорного вещества в верхней атмосфере, начинает действовать внутри тела, обеспечивая необходимую высокую концентрацию электростатической энергии, которая приводит к взрыву с высокой объемной плотностью энергии.

Предлагаемая гипотеза может быть проверена в условиях лабораторного эксперимента или машинного моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли.— М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958.— 640 с.
2. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики.— М.: Высшая школа, 1964.— 620 с.
3. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Демин Д. В. и др. О некоторых аномальных эффектах, связанных с падением Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 71—87.
4. Всехсвятский С. К. Эруптивные процессы в Галактике и гиперболические метеоры.— В кн.: Проблемы космической физики. Вып. 13. Киев: Вища школа, 1978, с. 141—146.
5. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций.— М.: Мир, 1973.— 280 с.
6. Действие ядерного взрыва.— М.: Мир, 1971.— 312 с.
7. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г.— Минск: Наука и техника, 1969.— 204 с.
8. Пасечник И. П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука, 1976, с. 24—54.
9. Соляник В. Ф. Тунгусская катастрофа 1908 г. в свете электрической теории метеорных явлений.— В кн.: Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980, с. 178—188.
10. Хаген Г. Синергетика.— М.: Мир, 1980.— 200 с.
11. Maisonnier C. Macroparticle accelerators and thermonuclear fusion.— Nuovo cimento, 1966, v. B42, N 2, p. 332—340.
12. Slattery J. C., Friichtenicht J. F. Ionisation probability of iron particles at meteoric velocities.— Astrophis. J., 1967, v. 147, N 1, p. 235—244.

В. И. ВАСИЛЬЕВ

## ЭТНОГРАФИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТЕОРИТАХ В МЕЖДУРЕЧЬЕ ТАЗА И ЕНИСЕЯ \*

В мировоззренческом комплексе ненцев и других народов севера Сибири еще в относительно недавнем прошлом определенное место занимал культ священных камней, которые почитались в связи с разными обстоятельствами в жизни человека. К этим камням люди об-

\* Автор — этнограф, совершивший более двадцати экспедиций в места, населенные ненцами и другими народами тундровой зоны. Он работал в Мезенском районе Архангельской области, на о. Колгуев, в Большеземельской тундре, в низовьях Оби, на п-ве Ямал, в бассейне р. Таз и на Нижнем Енисее. (Прим. отв. ред.)

ращались с просьбой содействовать в промысле. От них зависело, будут ли удачными задуманное предприятие или предстоящая поездка в соседнее стойбище. Священные камни могли способствовать избавлению от телесных недугов.

Находясь в силу каких-то обстоятельств поблизости от священного камня или проезжая мимо на нарте, ненец непременно останавливался и оказывал ему знаки внимания. Это должно было избавить от затруднений, невзгод в пути и иных превратностей судьбы. Во всех подобных случаях совершались жертвоприношения. Возле камней оставляли монеты, кусочки сукна, лоскутки меха; землю поблизости от них кропили спиртом или водкой, посыпали табаком. Иногда забивали оленя и оставляли на месте рога.

Роль священных камней в пантеоне народов Севера обычно выполняли наиболее выделяющиеся на местности утесы или скалы, причудливой формы валуны и т. д. Наряду с этим зафиксированы случаи, когда в качестве объектов поклонения и свершения культовых церемоний использовались предметы космического (вероятнее всего, метеоритного) происхождения.

Вот несколько полевых записей, в которых идет речь о ненецком родовом святилище под названием Нумгы-пой. Материалы, приведенные в настоящей заметке, в основном относятся к территории междуречья Таз — Енисей. Записи были сделаны в начале 1960-х гг., главным образом в пос. Потапово и Мал. Хета (Таймырский авт. нац. окр. Красноярского края). «Нумгы» в переводе с ненецкого означает «звезда». «Нумгы-пой» ненцы переводят по-разному: «между звездами», «бог-гора» и т. п.

Согласно ненецким рассказам, происхождение Нумгы-пой связано с небом. Во всяком случае, один из наших информаторов, Ф. И. Лырмин, 1888 года рождения, утверждал это весьма определенно: «Нумгы-пой — это наш лырминский шайтан (так ненцы именуют по-русски свои святилища. — В. В.). Раньше он с неба-место на землю-место упал. Нумгы-пой на Тазу был».

А вот рассказ очевидца К. Д. Ямкина, 1903 года рождения, побывавшего на оз. Нямбой-то в верховьях р. Таз, где находится Нумгы-пой, и наблюдавшего его. По его словам, Нумгы-пой лежал в специально сделанных нартах. «Санки деревянные, как балок (жилой домик, поставленный на нарты и представляющий собой деревянный каркас, обтянутый пологом, сшитым из оленьих шкур, и брезентом. — В. В.). Туда люди приходили. Приносили всякое и хозяевам отдавали».

Примечательно, что этот рассказ во многом, вплоть до деталей, совпадает с полевыми записями, сделанными на р. Таз в пос. Тибейсале Л. В. Хомич в 1968 г.\* Ее информатор ненец М. Ямкин видел аналогичный «шайтан» (название Нумгы-пой не приводится. — В. В.) в том же районе вблизи оз. Нямбой-то. По словам М. Ямкина, «священная нарта имела семь (пар. — В. В.) копыльев, на передних час-

---

\* Хомич Л. В. Религиозные культы у ненцев. — В кн.: Памятники культуры народов Сибири и Севера. Л., 1977, с. 10, 11.

тях нащеп было по семь зарубок, а головки нарт имели форму человеческих голов. На нарте был установлен деревянный ящик с отверстием или подобием дверцы». Далее М. Ямкин сообщает, что в ящике помещалась антропоморфная фигура, высеченная из черного камня, которой приехавшие помазали рот жертвенной кровью специально задущенного оленя. Это святилище принадлежало ненцам рода Нгаседа.

Енисейские ненцы также утверждают, что хозяевами шайтана Нумгы-пой были ненцы рода Нгаседа. Лырмины и Ямкины принадлежат к роду Нгаседа. Ф. И. Лырмин рассказывает: «Были хозяева у него Лырмины. Лырмин Пыяси старший». По словам К. Д. Ямкина, «хозяин у него Нгаседа был; старик был; он шаман был; Пелту старик». Существуют и другие ненецкие рассказы о «шайтанах» небесного происхождения. Вот некоторые из них.

О «шайтане» Яхя-муй, что в переводе с ненецкого означает «реки середина», рассказывает Ф. И. Лырмин: «Яхя-муй женщина была. Пальтинский шайтан (т. е. его хозяевами были ненцы рода Чор, носившие фамилию Пальчин. — В. В.). Тоже на Тазу. С неба-место упала посредине маленькой речки. А сама женщина большая. Люди пришли, хотели ее на санки класть, не помещается: такая большая. Второй раз пришли. Она меньше стала, но все равно не помещается. Третий раз пришли — совсем маленькая стала».

Другой рассказ, повествующий о «шайтане» под названием Моропан, принадлежит ненке М. Н. Сапожниковой (урожденной Ямкиной), 1913 года рождения, и связан географически уже не с Тазом, а с Енисеем. «Моропан против Карасина (поселок, в прошлом станок на Нижнем Енисее. — В. В.) упал. Как чугун, как камень был. Человек его нашел. Шаман или кто, не знаю. Цвет его черный. Он на правый берег упал. На яру в Карасино лежит. Его Нгаседа нашел. Третий или четвертый от нас, дедушка» (т. е. три или четыре поколения назад. — В. В.).

Приведенные этнографические материалы позволяют связывать некоторые культовые предметы сибирских ненцев (как, вероятно, и других народов Сибири) с упавшими на землю небольшими небесными телами или их осколками. Устанавливается и относительная хронология некоторых подобных событий. Можно, например, предполагать, что падение на землю небесного тела, именуемого по-ненецки Моропан, произошло (имея в виду условный поколенный счет, равный двадцати пяти годам) в середине прошлого — в первые годы нашего столетия.

Несомненно, для окончательной отработки, установления и уточнения приведенных этнографических материалов необходимы экспедиционные исследования с участием специалистов-астрономов и космологов.

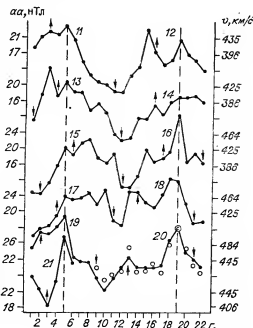
СОЛНЕЧНАЯ И ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ  
И ТУНГУССКИЙ ФЕНОМЕН

В работах [5, 6] найдена 22-летняя повторяемость второго максимума геомагнитной активности и скорости солнечного ветра в четных и нечетных циклах солнечной активности. В это время наблюдаются в основном двухсекторная структура межпланетного магнитного поля и рекуррентные высокоскоростные потоки солнечного ветра. Таким образом, общее магнитное поле Солнца в эти периоды является в основном дипольным и токовый слой располагается или меридионально, или под большими углами к солнечному экватору.

Согласно [2, 7, 8], в это время усиливается также солнечная активность, яркость короны в линии с  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ , радиоизлучение Солнца в метровых волнах, увеличивается количество мощных солнечных вспышек, крупных солнечных пятен.

В четных циклах солнечной активности подобный максимум геомагнитной активности наблюдался в четырех циклах из пяти за 100 лет наблюдений за геомагнитной активностью. В 14-м солнечном цикле, как это видно из рис. 1, четко выраженного максимума геомагнитной активности нет. Максимум  $aa$ -индекса «размазан» в течение трех лет. Самое удивительное состоит в том, что максимум геомагнитной активности должен приходиться на 1908 г., т. е. на год появления Тунгусского феномена. Случайно ли такое совпадение? Если учесть гипотезу, изложенную в [3, 4], и результаты работ [2, 5—8], то можно заключить, что оно не случайно, и тогда гипотеза о связи Тунгусского феномена с солнечными явлениями получает еще одно доказательство.

Рис. 1. Вариации геомагнитной активности (точки) за 1868 — 1983 гг. и скорости солнечного ветра (кружки) за 1964—1977 гг. Штриховые линии — синфазные возрастания геомагнитной активности через 22 года. Стрелками, направленными вверх, указаны годы максимумов, вниз — годы минимумов солнечной активности. Цифры у кривых — номера солнечных циклов.



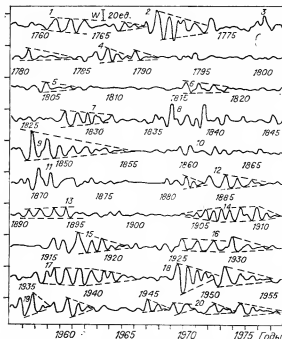


Рис. 2. Флуктуации солнечной активности (числа Вольфа) в 20 солнечных циклах. Штрихами выделены пути колебаний.

один раз по 7 точкам и один раз по 13. Последний ряд вычитался из первого. Таким образом получили данные  $\Delta W$ , имеющие колебания с периодами больше трех и меньше 13 мес. Предварительный анализ показал, что в первичных данных колебаний с периодами 13—22 мес очень мало.

Из рис. 2 видно, что в большинстве циклов солнечной активности в период максимума и после него наблюдаются флуктуации с периодами 6—12 мес и амплитудой до 20—30 единиц. При этом выделяется три типа флуктуаций  $W$ . Первый тип проявляется в виде мощного всплеска  $W$  и дуга колебаний, убывающих со временем по амплитуде и периоду. Так, в 9-м цикле колебания  $W$  фиксировались в течение 7 лет. В некоторых солнечных циклах такие колебания  $W$  начинались до максимума солнечной активности, в некоторых имели характер случайных флуктуаций. За цикл солнечной активности отмечается от одной до четырех флуктуаций  $W$ .

Другой тип флуктуаций наблюдался в циклах 1, 12, 13, 16. В них флуктуации  $W$  происходили с почти постоянной 3—4-летней амплитудой.

Третий тип наблюдался в 14-м цикле, где колебания  $W$  начались в 1904 г., в течение 1905—1907 гг. их амплитуды увеличивались, с 1907 по 1909 г. были постоянными и с 1910 по 1911 г. уменьшались. Солнечная активность в 14-м цикле имела два максимума: в 1905 и 1907 гг. Создается впечатление, что в 14-м солнечном цикле колебания солнечной активности, увеличиваясь со временем, достигли кри-



тических величин к 1908 г., в результате чего могли произойти аномальные явления на Солнце, вызвавшие Тунгусский феномен.

Итак, данные солнечной активности позволяют заключить, что 14-й цикл по флуктуациям солнечной активности обладает особенностями, отличающими его от других солнечных циклов.

Таким образом, можно сделать вывод, что если Тунгусский феномен связан с солнечной активностью, то, хотя он — явление исключительное, вероятность его повторения не равна нулю.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витинский Ю. И. Прогнозы солнечной активности. — М.— Л., 1963. — 151 с.
2. Гневыхев М. Н. Корона и 11-летний цикл солнечной деятельности. — Астроном. журнал., 1963, т. 40, с. 401—412.
3. Дмитриев А. П., Журавлев В. К. Тунгусский феномен 1908 года — вид солнечно-земных взаимосвязей. — Новосибирск: изд. ИГиГ СО АН СССР, 1984. — 143 с.
4. Журавлев В. К., Дмитриев А. Н. Гелиофизическая гипотеза природы Тунгусского феномена. — В кн.: Метеоритные исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1984, с. 128—141.
5. Чирков Н. П. О 22-летней периодичности геомагнитной активности и скорости солнечного ветра. — В кн.: Вариации космических лучей и солнечный ветер. Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1980, с. 18—24.
6. Чирков Н. П., Самсонов И. С. 22-летняя цикличность скорости солнечного ветра и геомагнитной активности. — Геомагнетизм и аэрономия, 1984, т. 24, с. 300—303.
7. Gnevyshev M. N. Essential Features of the 11-Year Solar Cycle. — Solar. Phys., 1977, v. 51, p. 175.
8. Gnevyshev M. N., Mikhailusta V. P. Stability of the Photometric Observations of the Solar Corona and Variations of its Intensity in the Solar Cycle 21. — Solar. Phys., 1984, v. 90, p. 177—184.
9. Solar-Geophysical Data, NOAA, Boulder, 1983, pt 1, N 470. — 13 p.

# СОДЕРЖАНИЕ

<i>Н. В. Васильев.</i> История изучения проблемы Тунгусского метеорита (1970—1980 гг.) . . . . .	3
<i>Ю. А. Львов, Н. В. Васильев.</i> О необходимости заповедования района Тунгусской катастрофы 1908 г. . . . .	34
<i>В. Д. Гольдин.</i> Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита . . . . .	44
<i>И. П. Пасечник.</i> Уточнение времени взрыва Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. по сейсмическим данным . . . . .	62
<i>В. Д. Несветайло.</i> Об одном типе термических поражений деревьев в районе падения Тунгусского метеорита . . . . .	63
<i>Е. Д. Лапшина, П. А. Баярчук.</i> Определение глубины залегания слоя 1908 г. в торфе в связи с поисками вещества Тунгусского метеорита . . . . .	80
<i>С. П. Голенецкий, А. П. Волошин, Е. Ф. Ковнацкий, Ю. А. Львов.</i> Использование растительных планшетов для измерений атмосферных потоков микроэлементов . . . . .	86
<i>М. Н. Цынбал, В. Э. Шнитке.</i> Газовоздушная модель взрыва Тунгусской кометы . . . . .	98
<i>С. А. Вишневский, Л. Н. Поспелова.</i> Импактный анатексис на примере ударно-метаморфизованных гнейсов Попигайской астроблемы . . . . .	117
<i>С. А. Вишневский.</i> Краевая часть Попигайской астроблемы: импактные диаграммы и горсты, новая интерпретация глубинного строения . . . . .	131
<i>Э. П. Изох.</i> Петрохимия пород мишени, импактитов и тектитов астроблемы Жаманшин . . . . .	159
<i>А. П. Бояркина, Н. В. Васильев, Г. Г. Глухов, Ю. А. Львов, В. И. Резчиков, С. И. Шелудько.</i> К оценке космогенного притока тяжелых металлов на поверхность Земли . . . . .	203
<i>П. А. Сергиенко, В. К. Журавлев.</i> Роль электронной компоненты внутренней энергии при торможении метеорных тел . . . . .	207
<i>В. И. Васильев.</i> Этнографические сведения о метеоритах в междуречье Таза и Енисея . . . . .	212
<i>Н. П. Чирков.</i> Солнечная и геомагнитная активность и Тунгусский феномен . . . . .	215

## КОСМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЗЕМЛЯ

Утверждено к печати Институтом геологии и геофизики СО АН СССР

Редакторы издательства *А. Ю. Степанова, Е. С. Иванова*

Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*

Художник *А. И. Смирнов*

Технический редактор *Н. М. Бурлаченко*

Корректоры *Н. М. Горбачева, Е. Н. Зимица*

---

ИБ № 29943

Сдано в набор 13.03.86. Подписано к печати 09.09.86. МН-01245. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага типографская № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л.  
14+1 печ. л. на мел. бум. Усл. кр.-отт. 15. Уч.-изд. л. 18. Тираж 1550 экз. Заказ № 97.  
Цена 3 р. 10 к.

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука», Сибирское отделение, 630099,  
Новосибирск, 99, Советская, 18.

4-я типография издательства «Наука», 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

**В Сибирском отделении  
издательства «Наука»**

**готовятся к выпуску следующие книги:**

**Арнаутов Н. В., Глухова Н. М., Яковлева Н. А.**  
**Приближенный количественный спектральный анализ природных объектов.— 5 л.**

Книга представляет собой наиболее полное справочно-методическое руководство для экспрессного определения 70 химических элементов в горных породах, рудах, минералах, почвах и других природных объектах. Она содержит рекомендации по расшифровке спектров, сводные таблицы предела обнаружения химических элементов, перечень стандартных образцов (ГСО), использованных при составлении таблиц, и отдельные таблицы (палетки) на каждый определяемый элемент.

Для работников спектральных лабораторий, химиков, геологов, геохимиков, агрохимиков.

**Процессы формирования рельефа Сибири/  
Н. А. Флоренсов, Л. Н. Ивановский, Г. Ф. Уфимцев  
и др.— 20 л.**

Рассмотрены процессы формирования рельефа Сибири. Впервые приводится целостная характеристика экзогенных процессов в различных поясах горного рельефа и на равнинах, эндогенных факторов морфогенеза. Приведена геолого-геоморфологическая интерпретация результатов изучения современных вертикальных движений земной коры. Рассмотрено влияние горных работ и заполнения водохранилищ на ход природных рельефообразующих процессов. Материалы излагаются с учетом их использования в прогнозных построениях.

Для геоморфологов и геологов.

**История изучения проблемы Тунгусского метеорита (1970—1980 гг.).**  
Васильев Н. В. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск:  
Наука, 1986.

Сделан обзор отечественных и зарубежных работ по проблеме Тунгусского метеорита за период 1969—1980 гг. Рассмотрены вопросы поисков вещества Тунгусского метеорита, минералогических, химических и изотопных исследований последних лет с целью обнаружения космических образований в районе падения. Долголетние поиски радиоактивности в различных субстратах района падения к успеху не привели. Большое внимание уделено расчетным работам по математическому моделированию Тунгусского взрыва для определения физических и энергетических параметров взорвавшегося тела. Подробно разобраны парадоксы Тунгусской проблемы: неоднозначность траектории и отсутствие ощутимых количеств вещества. Критически рассмотрены новые гипотезы природы Тунгусского тела. Сделан вывод, что по совокупности наблюдаемых фактов и расчетных данных Тунгусское тело более всего соответствует составу комет или доуглистых хондритов. Выявленный взрыв мутационного фона в окрестностях эпицентра пока еще удовлетворительного объяснения не получил. Библиогр. 151.

**О необходимости заповедования района Тунгусской катастрофы 1908 г.** Львов Ю. А., Васильев Н. В. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Обосновывается необходимость заповедования района падения Тунгусского метеорита 1908 г. в форме комплексного (биосферного) заказника. Этот район представляет собой уникальный полигон для исследования разового выпадения космического вещества кометной природы и физических и биологических эффектов, вызванных разрушением в атмосфере крупного космического тела. Границы предлагаемого заказника указываются по природным рубежам в пределах области вывала леса. Дана краткая характеристика природы района и степени ее изученности. Библиогр. 17.

**Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита.** Гольдин В. Д. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Сделан обзор работ, посвященных физическому и математическому моделированию некоторых явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита. Обсуждены исследования, посвященные анализу барических и сейсмических возмущений, вызванных Тунгусским взрывом, подробные газодинамические расчеты воздействия на поверхность Земли ударных волн, образовавшихся при полете и взрыве подобного разрушающегося тела. Проанализированы различные модели торможения и разрушения тела в атмосферах планет, привлекавшиеся для объяснения Тунгусского явления, а также работы, выполненные по моделированию возмущения геомагнитного поля, наблюдавшегося в день падения. Библиогр. 74.

**Уточнение времени взрыва Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. по сейсмическим данным.** Писсечник И. П. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

По временам поступления релеевских волн  $LR$ , зарегистрированных на сейсмических станциях Иркутск, Ташкент, Тифлис и Йена при землетрясении, вызванном взрывом Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г., уточнено время в его эпицентре  $O_{\text{эп}}$  — 00 ч  $13,6 \pm 0,1$  мин по гринвичскому времени. При расчетах  $O_{\text{эп}}$  использованы вновь построенные дисперсионные кривые групповых скоростей  $LR$  вдоль трасс, близких к трассам распространения этих волн при Тунгусском землетрясении. При построении кривых использованы сейсмические записи землетрясений на указанных выше станциях, эпицентры которых предполагались севернее и южнее района взрыва Тунгусского метеорита. Время взрыва метеорита  $O_{\text{взр}}$  в зависимости от принятых при расчетах значений его высоты и тротилового эквивалента, ранее определенных автором, на 2—8 с меньше  $O_{\text{эп}}$ . Из трех рассмотренных в настоящей работе районов возможных эпицентров, в которых обнаружены следы поверхностных нарушений лесного массива, наиболее вероятным является эпицентр № 1, расположенный в центре вывала леса, установленного Л. А. Куликом. По уточненному времени взрыва Тунгусского метеорита определено время  $\Delta t_m$  запаздывания магнитного эффекта, наблюдавшегося на Иркутской магнитной обсерватории в 0 ч. 20,2 мин. Оно составляет 6,6 мин.

Ил. 2. Табл. 3. Библиогр. 23.

Об одном типе термических поражений деревьев в районе падения Тунгусского метеорита. Несветаев В. Д. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Приведены сведения о распределении специфических для района падения Тунгусского метеорита термических поражений торцов обломанных деревьев. Сделана попытка объяснить механизм образования термических поражений. Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 13.

УДК 523.161.581.526.35

Определение глубины залегания слоя 1908 г. в торфе в связи с поисками вещества Тунгусского метеорита. Лапина Е. Д., Бляхвичук П. А. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Изложена методика определения глубины залегания катастрофического слоя 1908 г. в торфе на основе измерений линейных приростов мхов. Дана характеристика основных местообитаний сфагнум фускус с указанием наиболее вероятной глубины залегания слоя 1908 г.

Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 632.95+665.6:631.41

Использование растительных планшетов для измерений атмосферных потоков микроэлементов. Голенецкий С. П., Волошин А. П., Ковнацкий Е. Ф., Львов Ю. А. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Показано, что в целом микроэлементный состав растений хорошо коррелирует с составом атмосферных аэрозолей и их выпадений и плохо — с микроэлементным составом почв. Приведены доводы в пользу атмосферного источника многих жизненно важных микроэлементов в растениях. Обоснован способ изучения атмосферных потоков ряда естественных и техногенных микроэлементов с использованием растительных планшетов на основе сфагновых мхов и лугового разнотравья, а также картирования техногенных ландшафтов по элементному составу листьев деревьев. Предложенный способ использован для изучения состава фоновых атмосферных выпадений на значительной территории СССР и обследования техногенного ландшафта в зоне воздействия аэрозольных выбросов одного из предприятий цветной металлургии.

Ил. 3. Табл. 5. Библиогр. 26.

УДК 523.682.4:523.642

Газовоздушная модель взрыва Тунгусской кометы. Цыбал М. Н., Шнитке В. Э. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

В рамках кометной гипотезы Тунгусского явления предложено объяснение механизма взрыва смеси испарившихся компонентов кометного вещества с воздухом. Рассчитаны основные параметры детонации газовоздушной смеси, вычислены геометрические размеры космического тела и масса, необходимая для выделения при взрывчатом превращении энергии  $10^{17}$  Дж. Рассчитанные размеры и масса тела соответствуют современным оценкам ядер небольших комет. Показано, что предложенная гипотеза не противоречит реальной картине Тунгусского явления.

Табл. 4. Библиогр. 42.

УДК 552.164:552.11:552.32

Импактный анатексис на примере ударно-метаморфизованных гнейсов Поингайской астроблемы. Вишняевский С. А., Посенелова Л. Н. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Приведено описание импактного анатексиса пород и определена его роль в формировании бисрапальных тагматов кратера. Выделено два типа такого анатексиса: ранний (на завершающем этапе снятия ударной нагрузки) и поздний (постударная эволюция импактитов). В результате импактного анатексиса из гнейсов вымывается высококремнистый расплав, обогащенный калием и легкими ( $H_2O+CO_2$ ). Как прослежено по включениям гнейсов и тагматов и других импактатах, анатексис начинается при ударах давлениях 27–30 ГПа и завершается при нагрузках порядка 50 ГПа и выше, когда минеральная структура породы уничтожается и образуется смешанный тагматовый расплав. Временные рамки процесса таковы, что ранний импактный анатексис гнейсов, по-видимому, характерен только для крупных астроблем. Анатектизированные гнейсы, возможно, составляют один из элементов глубинной структуры астроблемы. Проведено сопоставление импактного анатексиса с мантийным.

Ил. 3. Табл. 5. Библиогр. 19.

**Красная часть Попигайской астроблемы: импактные диатремы и горсты, новая интерпретация глубинного строения. В. И. Шелудько С. А. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.**

В краевой части Попигайской астроблемы обнаружены специфические мегаструктуры деформации пород мишени — импактные диатремы и горсты, сингенетичные с процессом эваскации кратера. Приведено описание этих структур. С учетом экспериментальных данных по крупномасштабным взрывам сделана попытка качественно проанализировать влияние свободной поверхности и двухслойного строения мишени астроблемы на амплитуду и геометрию ударной волны в дальней приповерхностной области затухания. Возникающее здесь поле динамических нагрузок позволяет предложить механизм приповерхностной эваскации, удовлетворительно объясняющий происхождение импактных диатрем и горстов, а также некоторых особенностей состава и структуры коптогенного комплекса. Дана новая интерпретация глубинного строения краевой части астроблемы, согласно которой эта астроблема обладает двойной внешней границей: поверхностью, в породах чехла, и «погребенной», в породах фундамента; в рамках этих границ диаметр астроблемы составляет соответственно 100 и 110 км. Затронута проблема поисков вещества упавшего тела в импактах астроблемы. Намечены задачи предстоящих исследований астроблемы.

Ил. 8. Библиогр. 22.

УДК 551.243:523

**Петрохимия пород мишени, импактитов и тектитов астроблемы Жамниши. Изюх Э. П. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.**

На основании 370 силикатных анализов (из них более 250 оригинальных) дана детальная петрохимическая характеристика пород астроблемы. Описаны следующие группы: 1) исходные породы складчатого фундамента  $P_2$ — $P_3$  и  $S_1$ , главным образом кремнистые и вулканогенные базальтоиды; 2) импактиты 1-го рода по тем же породам; 3) импактиты 2-го рода (расплавленные стекла), соответствующие основным жамнишинам и основным иргизитам, по П. В. Флоренскому, образованные преимущественно за счет вулканитов  $S_1$ ; 4) тектиты-жамнишины, аналогичные австрало-азиатским тектитам типа Муонг-Нонг и не имеющие вещественных аналогов среди пород мишени; 5) тектиты-иргизиты (кислого состава), родственные предыдущим, но имеющие систематические отличия в составе и, возможно, являющиеся продуктами вторичного переплавления тектитов. Рассмотрены соотношения между импактитами и тектитами. Намечен круг вопросов, касающихся специфики формирования астроблемы и зачатки тектитов, требующих решения при дальнейших исследованиях.

Ил. 34. Табл. 31. Библиогр. 32.

УДК 523.161

**К оценке космогенного притока тяжелых металлов на поверхность Земли. Волякина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г., Лызов Ю. А., Резчиков В. И., Шелудько С. И. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.**

Приводятся результаты нейтронно-активационного анализа торфа из района междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок. Получены оценки верхних границ выпадения железа, кобальта, скандия, золота на поверхность Земли в составе космической пыли. Эти данные могут служить в качестве фоновых при исследовании вещества Тунгусского метеорита.

Табл. 2. Библиогр. 14.

УДК 523.682.4+539.183.3

**Роль электронной компоненты внутренней энергии при торможении метеорных тел. Сергиенко Н. А., Журавлев В. К. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.**

В статье рассмотрено явление электродинамического разбаланса вещества при торможении быстрых метеоров и других тел, движущихся со скоростью 70—100 км/с, когда кинетическая энергия атомов становится сравнимой с энергией связи электронов. Дано физическое обоснование одному из видов разбаланса вещества и освобождения электростатической (кулоновской) энергии, аккумуляруемой атомами. Исследована роль туннельного эффекта, способствующего уходу электрона с орбиты атома, находящегося в электрическом поле при интенсивной накачке ультрафиолетовым излучением, которое образуется вследствие глубокой ионизации атомов при быстром торможении метеорита в среде. Определены критические скорости для некоторых элементов. Сделано предположение об электродинамическом характере взрыва Тунгусского метеорита как следствия разбаланса вещества и освобождения электростатической энергии за счет преобразования кинетической энергии метеорного тела.

Табл. 1. Библиогр. 12.

Этнографические сведения о метеоритах в междуречье Таза и Енисея. Васильев В. И. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

В статье сообщается об использовании тел небесного происхождения в качестве ритуальных предметов жителями низовьев Енисея.

Солнечная и геомагнитная активность и Тунгусский феномен. Чирков Н. П. Космическое вещество и Земля.— Новосибирск: Наука, 1986.

Анализируется солнечная и геомагнитная активность соответственно за 10 последних солнечных циклов с целью обнаружения каких-либо аномалий в них, связанных с Тунгусским феноменом. Выяснено, что в течение 1907—1910 гг. наблюдалась высокая геомагнитная активность, а значит, и скорость солнечного ветра тоже была высокой. Но в 1908 г. не было пикового возрастания геомагнитной активности, хотя до Тунгусской катастрофы и после нее через каждые 22 года оно проявлялось. Анализ флуктуаций солнечной активности показал некоторые их особенности в 14-м солнечном цикле, когда наблюдался Тунгусский феномен. В начале 14-го цикла отмечались нарастающие по амплитуде флуктуации солнечной активности с периодами 6—9 мес в течение четырех лет до Тунгусского феномена, чего не происходило в другие солнечные циклы. Полученные результаты подтверждают гипотезу о солнечном происхождении Тунгусского феномена.

Ил. 2. Библиогр. 9.







3

15



